

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

МИКИТЕНКО ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ

УДК 621.384.3

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОПТИКО- ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ З КОМПЛЕКСУВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Спеціальність 05.11.07 – оптичні прилади та системи

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В. І. Микитенко

Науковий консультант: Колобродов Валентин Георгійович, доктор технічних
наук, професор, лауреат Державної премії України

Київ - 2020

АНОТАЦІЯ

Микитенко В.І. Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.07 - оптичні прилади та системи. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню наукової проблеми підвищення ефективності оптико-електронних систем спостереження (ОЕСС) з комплексуванням зображень шляхом створення на єдиних методологічних засадах наукових основ і прикладних методів аналізу, проектування та узгодження інформаційних каналів.

Галузі використання ОЕСС охоплюють значний діапазон життєдіяльності людини – від сільського господарства і медицини до військових і космічних спостережень. При цьому споживчий ринок вимагає постійного підвищення ефективності функціонування апаратури. Зазвичай до складу переносних або бортових ОЕСС входять кілька спектральних каналів видимого та інфрачервоного (ІЧ) діапазону спектру. Завдяки поєднанню (комплексуванню) інформації різних каналів можна значно покращувати якість інформації про стан фоно-цільової обстановки (ФЦО). Методи комплексування спектральних та панхроматичного зображень найбільш широко використовуються при дистанційному зондуванні Землі з космосу. Останніми роками унікальні і дорогі технічні рішення, які були характерними для космічних ОЕСС, почали адаптуватись для інших галузей техніки – насамперед – авіаційних і наземних спостережень в військових задачах і для екологічного моніторингу. Цей процес розширюється і потребує вирішення багатьох наукових і технологічних проблем. При цьому на тлі підвищення вимог до технічних характеристик апаратури першочерговими стали питання економічної ефективності

технічних рішень, обґрунтованості фінансових витрат на проектування, виготовлення та експлуатацію апаратури.

Практика сьогодення і аналіз найближчих перспектив розвитку галузі показали, що для забезпечення достатньої ефективності функціонування ОЕСС в більшості випадків достатньо мати два інформаційні канали – телевізійний (ТВ) і тепловізійний (ТПВ). Іноді доцільно замінити ТВ канал на суто оптичний пристрій, або забезпечити можливість роботи ТВ каналу за умов низького рівня освітлення, або розділити робочий видимий діапазон спектру на кілька піддіапазонів. Також в залежності від поточної задачі спостереження часто в ОЕСС передбачають можливість зміни поля зору. Споживачем інформації, яка формується ОЕСС, є людина-оператор, що потребує першочергового врахування і фактично впливає на всю ідеологію побудови інформаційної системи. В будь-якому випадку обов'язковою передумовою створення ефективної в споживчому і в технічному плані ОЕСС є узгодження інформаційних каналів між собою, із джерелами та споживачем інформації з врахуванням поточної задачі спостереження. Таке узгодження має проводитися на апаратному та програмному рівнях і передбачає об'єднання зусиль фахівців різних галузей – розробників основних блоків ТВ і ТПВ каналів, спеціалістів з обробки зображень, психофізіологів.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану багатоканальних ОЕСС з комплексуванням інформації і проблемам, пов'язаним з розвитком цієї галузі. Показано, що на найближчу перспективу для вирішення більшості задач дистанційного спостереження достатньо використання двох інформаційних каналів – ТВ та ТПВ, а для кількісного аналізу стану ФЦО при авіа-космічних спостереженнях доцільно використовувати відеоспектрометри. Відеоспектрометри є гіперспектральними приладами, в яких комплексування зображень відбувається автоматично в оптичному каналі й не потребує окремого розгляду. Розглянуто методи послідовного в інформаційних каналах та паралельного між каналами комплексування зображень. Ефективне комплексування зображень в двоканальних ОЕСС пов'язане з вирішенням великої кількості технічних проблем. Окрім традиційних питань, які виникають при проектуванні окремих спектральних

каналів, в ОЕСС з комплексуванням залишаються невирішеними проблеми міждисциплінарного характеру. По-перше, алгоритми комплексування розробляються в рамках галузі прикладної математики і фактично не враховують фізичні аспекти утворення сигналів. По-друге, суттєво нелінійні процеси злиття зображень при комплексуванні не можна безпосередньо імплементувати в стандартні для оптико-електронного приладобудування лінійні розрахункові математичні моделі. По-третє, значний вплив на функціонування системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор» здійснює споживач кінцевої інформації – оператор, який може виконувати різні поточні задачі спостереження.

Таким чином, для можливості аналізу й синтезу ОЕСС з комплексуванням необхідно створити математичну модель, яка враховує не тільки інформаційні канали ОЕСС, але й процес злиття зображень, механізми зорового сприйняття при вирішенні різних зорових задач. Обов'язковим елементом моделі має стати метод оцінювання візуальної якості зображення, який дозволить визначити ймовірнісні характеристики ефективності виконання поточної зорової задачі. Доцільно обмежити зорові задачі виявленням, розпізнаванням та ідентифікацією об'єкта спостереження.

Для створення завершеної методології розробки ОЕСС розрахункові методи моделювання необхідно доповнити методами узгодження основних блоків інформаційних каналів як в середині, так і між каналами, а також експериментальними методами визначення основних характеристик ОЕСС. Розглянуті питання дозволили сформулювати мету та задачі дослідження дисертації.

У другому розділі було формалізовано процеси, що відбуваються в основних блоках системи «ФЦО – ОЕСС – оператор» при вирішенні поточної зорової задачі. Створено математичну модель інформаційних каналів ОЕСС й досліджено особливості формування та перетворення сигналів в ТВ і ТПВ каналах. Розглянуто особливості зорового сприйняття, які є важливими для формування рішення на виході всієї інформаційної системи. Математичне моделювання виконано в рамках теорії лінійних систем. Показано, що комплексування інформації, як суттєво

нелінійний процес, не може бути описано в рамках цієї теорії. Визначено можливий спосіб вирішення цієї проблеми, який полягає у заміні механізму аналітичного обрахування певного параметру сигналу на виході блоку комплексування механізмом чисельного визначення показника ефективності функціонування ОЕСС при заданих умовах спостереження та поточному методі комплексування.

В третьому розділі вирішується задача створення механізму кількісного визначення ефективності функціонування ОЕСС з врахуванням зорового сприйняття оператора. Розглянуті питання оцінки якості як окремих спектральних каналів ОЕСС, так і ефективність функціонування інформаційної системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор» в цілому. Найбільш вживаними для оцінки ефективності функціонування ОЕСС узагальненими характеристиками є дальності виявлення, розпізнавання або ідентифікації об'єкта при заданій ймовірності, точність наведення візирної осі при прицілюванні. Для визначення таких споживчих характеристик використовуються часткові показники просторового та енергетичного розділення. Також коротко проаналізовано показники ефективності комплексування й показано, що вони не можуть бути безпосередньо застосованими при аналізі й синтезі ОЕСС.

Однією з найбільш інформативних на сьогодні оцінок окремих спектральних каналів є показник успішності виконання завдання (*TTP* – Targeting Task Performance), який доцільно застосовувати в аналітичному вигляді для порівняння інформативності зображень в каналах. Розроблено алгоритм використання цього показника для прогнозування ефективності комплексування інформації в ОЕСС. Він полягає в чисельному визначенні показників *TTP* для різних способів комплексування по реальних вихідних зображеннях.

Четвертий розділ присвячено розробленню методів розрахункового та конструктивного узгодження основних параметрів головних блоків ОЕСС для досягнення максимальної ефективності за критеріями, що витікають із призначення системи та поточної задачі спостереження. Узгодження відбувається за геометричною та енергетичною роздільною здатністю спектральних каналів з використанням математичної моделі, створеної в другому розділі. Розроблені

методи стосуються як окремих спектральних каналів, так і двоканальної ОЕСС. В методі узгодження об'єктів двоканальної ОЕСС використовується показник TTP . Запропоновано методи узгодження геометричних параметрів моноблочних коліматорних та телескопічних прицілів.

Суть п'ятого розділу полягає в удосконаленні експериментальних методів визначення основних характеристик спектральних каналів ОЕСС. Створено методи вимірювання функції передачі сигналу, зонної характеристики та спектральної характеристики. Запропоновано оригінальну структуру вимірювального стенду з використанням нового дифузного випромінювача змінної яскравості. Атестація всіх елементів стенду проводиться від одного робочого еталона, чим досягається єдність схем калібрування та передачі розміру одиниці спектральної щільності енергетичної яскравості. Теоретично і експериментально показано, що запропонований метод забезпечує кращі метрологічні характеристики енергетичного калібрування ОЕСС в порівнянні з відомими методами і установками.

Шостий розділ присвячено експериментальному дослідженню запропонованих методів обробки зображень в ОЕСС та оцінці ефективності розроблених методів узгодження основних блоків ОЕСС. З використанням суб'єктивних експертиз виконано порівняльний аналіз ефективності основних методів комплексування зображень в лабораторних та польових умовах. Показано, що в залежності від умов та від поточної задачі спостереження найкращу візуальну якість забезпечують різні способи комплексування. Досліджено нові методи послідовного та паралельного комплексування в ОЕСС у складі ТВ і ТПВ інформаційних каналів з використанням карти інформативності. Для визначення основного інформаційного каналу використовується показник TTP , який обраховується аналітично. Вибір найкращого методу злиття зображень здійснюється на основі показників TTP , які визначаються чисельним способом після комплексування різними способами й потім порівнюються між собою. Експериментально підтверджено покращення ймовірнісних характеристик виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта при використанні розробленої

стратегії комплексування.

Також досліджено й теоретично підтверджено можливість використання цифрових когерентно-оптичних процесорів в ОЕСС для підвищення швидкодії обробки інформації в багатоканальних системах при чисельному визначенні показника TTP . Створено спрощену математичну модель когерентно-оптичного процесору, яка є сумісною з основною моделлю системи «ФЦО – ОЕСС – оператор».

Для компенсації вібрацій та підвищення просторового розділення проаналізовано можливості послідовної обробки зображень в ОЕСС шляхом неконтрольованого мікросканування. Доведено ефективність використання запропонованого алгоритму при низькочастотних вібраціях в межах одного спектрального каналу.

Ключові слова: оптико-електронна система спостереження, комплексування зображень, критерії ефективності функціонування, радіометричне розділення, енергетичне калібрування, підвищення просторового розділення, малогабаритні приціли, зорове сприйняття.

ANNOTATION

Mykytenko V.I. Improving the Efficiency of Optoelectronic Surveillance Systems with Image Fusion. – Qualification scientific work manuscript copyright.

Thesis for a degree of Doctor of technical sciences in the Faculty of Instrumentation Engineering by speciality 05.11.07 Optical Devices and Systems. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem of increasing performance of optoelectronic surveillance systems (OESS) with image fusion by creating scientific bases and applied methods of analysis, synthesis and adjustment of information channels on a uniform methodological basis.

The use of OESS covers a wide range of human activities, from agriculture and medicine to military and space surveillance. In this case, the consumer market requires

constant improvement of the equipment efficiency. Typically, portable or on-board OESS includes several visible and infrared (IR) spectral information channels. By combining (fusion) the information of different channels, you can significantly improve the quality of information about background in the field of view. Spectral and panchromatic image fusion methods are most widely used in Earth remote sensing from space. In recent years, the unique and expensive technical solutions of space-based OESS have begun to adapt to other areas of technology. First of all this concerns aviation and ground surveillance in military missions and environmental monitoring. The process is expanding and many scientific and technological problems need to be solved. At the same time, against the background of increasing requirements for the equipment technical characteristics, the issues of cost-effectiveness of technical solutions, validity of equipment design, manufacture and operation financial costs became a priority.

The industry development today's and perspective state analysis have shown that in order to ensure sufficient OESS efficiency in most cases it is sufficient to have two information channels - television (TV) and thermal imaging (THI). Sometimes it is advisable to replace the TV channel with a purely optical device, or to allow the TV channel to operate in low light conditions, or to split the operating visible spectrum into several subbands. Also depending on the current observation task, OESS often provide the possibility of changing the field of view. The consumer of information that is formed by the OESS is a human operator. This fact actually influences the whole ideology of information system design and requires special attention. In any case, it is a prerequisite to create an effective OESS to coordinate information channels with each other, with sources and consumers of information, taking into account the current surveillance task. Such coordination should be carried out at the hardware and software levels and involves the efforts of specialists of various industries - TV and THI engineers, imaging specialists, psychophysicologists.

The first section of the dissertation is devoted to the analysis of the multichannel OESS with information fusion current state and to the related problems. It is shown, that in the short-term perspective, the use of two information channels - TV and THI - is sufficient to solve most of the remote observation tasks, and it is advisable to use video

spectrometers for quantitative analysis of the background state in aerospace observations. Video spectrometers are hyperspectral devices, in which the image fusion occurs automatically in the optical channel and does not require special consideration. The image fusion methods in information channels and parallel fusion methods between channels are considered. Effective image fusion in dual-channel OESS involves many technical problems. In addition to the traditional issues that arise in the individual spectral channels design, interconnectivity issues remain unresolved in the OESS. First, fusion algorithms are developed within the field of applied mathematics and do not actually take into account the physical aspects of signal generation. Second, substantially nonlinear image fusion processes cannot be directly implemented in standard linear mathematical models for optoelectronic instrumentation. Thirdly, the consumer of final information, an operator who can perform various current surveillance tasks, has a significant impact on the functioning of the «background - OESS – operator» system.

Thus, in order to be able to analyze and synthesize OESS with image fusion, it is necessary to create a mathematical model that takes into account not only OECS's information channels, but also the image fusion process, the visual perception mechanisms for various visual tasks. A mandatory element of the model should be a visual image quality assessing method, which will determine the probabilistic performance characteristics of the current visual task. It is advisable to limit visual tasks to the detection, recognition and identification of the object.

In order to create a complete OESS methodology, the simulation calculation methods need to be supplemented by methods of reconciling the main blocks of information channels both in the middle and between the channels, as well as experimental methods for determining the main characteristics of the OESS. The considered questions allowed to formulate the purpose and tasks of the dissertation research.

In the second section, the processes occurring in the main units of the «background - OESS – operator» system in solving the current visual task, were formalized. The mathematical model of OESS information channels was created and the peculiarities of signal formation and transformation in TV and THI channels were investigated. The

features of visual perception that are important for decision making at the output of the whole information system are considered. Mathematical modeling is performed within the framework of linear systems theory. It is shown, that information fusion, as a substantially nonlinear process, cannot be described within the framework of this theory. A possible way of solving this problem is identified, which is to replace the mechanism of analytical calculation of a certain signal parameter at the output of the fusion unit by the mechanism of numerically determining the efficiency of the OESS under the given observation conditions and the current fusion method.

In the third section the problem of creation of the OESS performance evaluation mechanism is solved taking into account the operator's visual perception. The issues of quality assessment of both individual spectral channels of the OESS, as well as the efficiency of whole information system «background - OESS with image fusion – operator» are considered. The range of detection, recognition or identification of the object at a given probability, the precision of the sighting axis when aiming are most commonly used generalized characteristics for OESS performance evaluation. Spatial and energy resolution are used to determine consumption characteristics. There were also briefly analyzed fusion efficiency evaluation methods which shows that they cannot be directly applied in the analysis and synthesis of OESS.

One of the most informative estimates of individual spectral channels to date is the Targeting Task Performance (TTP). It can be used analytically to compare the informational content of images in channels. An algorithm for using this metric to predict the efficiency of information fusion in the OESS has been developed. It consists of numerically defining TTP metrics for different ways fused real-life source images.

The fourth section is devoted to the development of calculation and constructive methods of the main OESS units matching for maximum efficiency of current task of observation. The alignment occurs on the geometric and energy resolution of the spectral channels using the mathematical model created in the second section. The developed methods apply to both single spectral channels and dual-channel OESS. TTP metric is used to coordinate dual-channel OESS lenses. Methods of harmonization of geometric parameters of monoblock collimator and telescopic sights are offered.

The content of the fifth section is to improve the experimental methods for determining the main characteristics of the OESS spectral channels. Methods for measuring the signal transmission function, band characteristic and spectral characteristic were developed. The original structure of the measuring stand was proposed using a new diffuser of variable brightness. Certification of all elements of the stand is carried out from one working standard, which provides the unity of calibration schemes and the transfer of the unit size of the spectral density of energy brightness. It is theoretically and experimentally shown, that the proposed method provides better metrological characteristics of the energy calibration of the OESS compared to the known methods and stands.

The sixth section is devoted to the experimental study of the proposed methods of image processing in the OESS and the evaluation of the efficiency of the developed coordination methods. Using subjective expertise, a comparative analysis of the effectiveness of the main image fusion methods in laboratory and field conditions was performed. It is shown that, depending on the conditions and on the current observation task, the best visual quality is provided by different fusion methods. New methods of serial and parallel fusion in OESS with TV and THI information channels with use of information map are investigated. The TTP metric, which is analytically calculated, is used to determine the driving information channel. The choice of the best image fusion method is made on the basis of TTP metrics, which are determined numerically after fusion in different ways and then compared with each other. Improvement of the probabilistic characteristics of detection, recognition and identification of an object using the developed fusion strategy has been experimentally confirmed.

The possibility of using digital coherent optical processors in OESS to improve the information processing speed in the numerical determination of the multichannel systems TTP metric is also investigated and theoretically confirmed. A simplified mathematical model of a coherent optical processor is created, which is compatible with the basic «background - OESS – operator» model.

In order to compensate for vibrations and increase spatial resolution, the possibility of sequential image processing in OESS by uncontrolled microscanning has been

analyzed. The efficiency of using the proposed algorithm in low-frequency vibrations conditions within one spectral channel is proved.

Keywords: *optoelectronic surveillance system, image fusion, performance evaluation, radiometric resolution, measurement of energy characteristics, spatial resolution enhancement, small-scale sights, visual perception.*

Список публікацій здобувача

1. Микитенко В.І. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія / Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Поліграфічний центр «Аверс», Київ, 2013. – 178 с.

Особистий внесок: обґрунтовано експериментально підтверджено новий метод оцінки ефективності роботи системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор».

2. Микитенко В.І. Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження: монографія / В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко, Є.Г. Балінський // Київ: «Вік прінт», 2017. - 202 с.

Особистий внесок: виконано порівняльний аналіз алгоритмів визначення ефективності іконічних інфрачервоних ОЕСС, виділено першочергові проблеми галузі та визначено можливі напрями їх вирішення.

3. Микитенко В.И. Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли / Колобродов В.Г., Бородийчук П.В., Микитенко В.И. // Космічна наука і технологія. - 1998. - т.4, №1. - С.29-38. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar).

Особистий внесок: досліджено переваги й недоліки схемотехнічних рішень одержання авіакосмічних гіперспектральних зображень.

4. Микитенко В.И. Классификация и методика сопоставительного анализа оптических схем коллиматорных прицелов / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003. - Вып. 7. - С.8-12. (Наукове фахове видання України

з технічних наук).

Особистий внесок: запропоновано спрощений узагальнений показник якості колімаційних прицілів для стрілецької зброї.

5. Микитенко В.И. Оптимизация конструкции моноблочного коллиматорного прицела / Микитенко В.И., Сенаторов Н.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003.- Вып. 8. - С.27-29. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

Особистий внесок: обґрунтовано перелік часткових показників якості, які визначають ефективність малогабаритних моноблочних прицілів і дозволяють знайти компроміс між діаметром вихідної зіниці та масою моноблока.

6. Микитенко В.И. Модели параллактической ошибки коллиматорного прицела на базе сферического зеркала со смещенной геометрической осью / Микитенко В.И., Сенаторов Н.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003. - Вып. 9. - С.20-24. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

Особистий внесок: розроблено рекомендації по забезпеченню точності суміщення візуального й прицільного каналів в меніскових колімаційних прицілах.

8. Микитенко В.И. Модели параллактической ошибки линзового моноблочного коллиматорного прицела / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2004.- №1(10). - С.34-36. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

Особистий внесок: запропоновано схемотехнічне рішення моноблочного колімаційного прицілу із зменшеною похибкою суміщення візуального й прицільного каналів.

10. Микитенко В.И. Полунатурная модель цели для определения исходных данных стрельбы из стрелкового оружия / Сенаторов Н.В., Лагно Ю.В., Микитенко В.И., Гурнович А.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2004.- №2(11). - С.35-37. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

Особистий внесок: визначені параметри руху об'єкта в полі зору оператора при спостереженні з допомогою ОЕСС.

12. Микитенко В.И. Оценка эффективности выполнения боевой задачи оператором стрелкового оружия с оптическим прицелом / Сенаторов Н.В., Гурнович А.В., Микитенко В.И., Лагно Ю.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2005. - №1(14). - С.4-7. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

Особистий внесок: запропоновано механізм врахування особливостей зорового сприйняття при визначенні ймовірності попадання в ціль.

13. Микитенко В.І. Комплексування інформації в оглядово-візирних системах керованих рухомих об'єктів / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2005. - Вип. 30. - С. 36 - 41. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

14. Микитенко В.И. Методы и средства измерения энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли / Вариченко Л.В., Колобродов В.Г., Ладыка Я.Е., Микитенко В.И., Михеенко Л.А. // Космічна наука і технологія. - 2006. - т.12, №2/3. - С.59-69. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar та інших).

Особистий внесок: запропоновано варіанти конструктивних рішень лабораторного стенду та елементної бази для вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС.

15. Микитенко В.І. Дослідження релевантних ознак зображень в ОЕП телевізійного типу / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2006. - Вип. 31. - С. 24 - 31. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

16. Микитенко В.І. Моделювання зображення у задачах комплексування каналів оптико-електронних систем / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2007. - Вип. 33. - С. 24 - 29. (Видання

індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PИHЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Особистий внесок: розроблено спрощену енергетичну модель формування випромінювання в спектральному діапазоні (0,4 – 14) мкм.

17. Микитенко В.І. Багатоканальні іконічні системи дистанційного моніторингу / Богатирьова Г.В., Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Вісті академії інженерних наук України. - 2007. - №2(32). - С.21 - 26. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar).

Особистий внесок: виконано аналіз перспективних галузей використання багатоканальних ОЕСС.

18. Микитенко В.І. Тенденції розвитку космічних оптико-електронних систем спостереження Землі / Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2007. - №3. – С.115-120. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

Особистий внесок: обґрунтовано типи входних оптичних блоків для перспективних нано- та мікро-супутників.

19. Микитенко В.І. Вибір показника якості в багатоканальних бортових оглядово-пошукових оптико-електронних системах / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2007. - Вип. 34. - С.40 - 45. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PИHЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

20. Микитенко В.И. Исследование тепловой составляющей окислительно-восстановительных процессов методом динамической термографии / Котовський В.Й., Микитенко В.И. // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники». - 2008. - Ч.2 - №3-4. - С.93 - 95. (Видання індексується в наукометричних базах COPE, CrossRef, IC Journals Master List, BASE, Google Scholar, OpenAIRE, PBN, SIS, WorldCat).

Особистий внесок: обґрунтовано параметри двокальної ОЕСС для дослідження температурних розподілів на тілі людини.

21. Микитенко В.І. Багатоканальні системи технічного зору для дистанційного

енергоаудиту складних об'єктів / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Вісті академії інженерних наук України. - 2008. - №2(36). - С.16 - 19. (Видання індексується в наукометричній базі Google Scholar).

Особистий внесок: запропоновано метод підвищення точності дистанційного вимірювання температур будівель шляхом використання двоканальних ОЕСС.

22. Микитенко В.І. Дистанційні спостереження в тумані з допомогою пасивних двоканальних іконічних оптико-електронних систем / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2008. - Вип. 35. - С.29 - 36. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Особистий внесок: розроблено математичну модель формування сигналів в видимому та інфрачервоному діапазонах спектру.

23. Микитенко В.І. Комплексування зображень в багатоканальних оптико-електронних системах з різноформатними матричними приймачами випромінювання / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісті академії інженерних наук України. - 2008. - №3 (37). - С.38 - 44. (Видання індексується в наукометричній базі Google Scholar).

Особистий внесок: проаналізовано якість просторового суміщення матричних зображень в двоканальних оптичних системах різного типу.

24. Микитенко В.І. Применение голографического оптического элемента при создании малогабаритных коллиматорных прицелов / Сенаторов Н.В., Полежаев В.В., Микитенко В.І., Сенаторов В.Н. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический журнал. - 2008.- №3(28). - С.27-34. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

Особистий внесок: виконано оцінку потенційної точності прицілювання в малогабаритних прицілах з голографічними оптичними елементами.

25. Микитенко В.І. Підвищення роздільної здатності зображень, спотворених лінійним рівномірним рухом / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2008. - Вип. 36. - С.24 - 30. (Видання

індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PИИЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Особистий внесок: запропоновано використати неконтрольоване мікросканування для покращення просторового розділення шляхом послідовного комплексування зображень в одному спектральному каналі.

26. Микитенко В.І. Вибір оптико-електронної системи малорозмірного університетського супутника / Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., Марченко В.О., Микитенко В.І. // Вісник ЧДТУ. - 2008. - №2. - С. 167 - 172. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Academic Recource Index, WorldCat, CrossRef, Ulrich's Periodicals Directory).

Особистий внесок: обгрунтовано склад апаратури для дистанційного зондування Землі в оптичному діапазоні з борта недорогого мікросупутника.

27. Микитенко В.І. Використання багатоканальних оптико-електронних систем для дослідження біологічних об'єктів / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». - 2009. - Ч.1 - №2-3. - С.187 – 190. (Видання індексується в наукометричних базах COPE, CrossRef, IC Journals Master List, BASE, Google Scholar, OpenAIRE, PBN, SIS, WorldCat).

Особистий внесок: виготовлено та відюстовано макет двоканальної ОЕСС для лабораторних вимірювань температури шкіри людини.

28. Микитенко В.І. Энергетическая калибровка многоспектральных сканирующих устройств высокого разрешения / Михеенко Л.А., Микитенко В.І. // Космічна наука і технологія. - 2009. - т.15, №3. - С.42-49. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar).

Особистий внесок: запропоновано схему вимірювальної установки для експериментального визначення енергетичних характеристик багатоканальних ОЕСС з широким динамічним діапазоном.

29. Микитенко В.І. Модернізація авіаційного стрілецького прицілу комплексування інформаційних каналів / Микитенко В.І., Сенаторов М.В. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.- 2010. - Вип. 40. - С.86 - 93.

(Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Особистий внесок: обґрунтовано можливість модернізації авіаційного стрілецького прицілу шляхом комплексування індикатора на лобовому склі й візирної головки.

30. Микитенко В.И. Стратегия комплексирования информации в двухканальных оптико-электронных системах наблюдения с разными полями зрения / Микитенко В.И., Рибалко М.С. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2011. - №1(38). - С.19-23.

Особистий внесок: запропонований алгоритм реєстрації та злиття телевізійного та тепловізійного зображень в ОЕСС на основі карти інформативності, яка формується в високочастотній області просторового спектру.

31. Микитенко В.І. Узгодження діаметрів вхідних зіниць дзеркально-лінзового об'єктиву двоканальної ОЕСС / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2011. - Вип. 42. - С.54 – 61. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Особистий внесок: запропоновано використання показника ТТР для узгодження основних параметрів вхідних блоків двоканальної ОЕСС.

32. Микитенко В.І. Підвищення ефективності роботи тепловізійної системи при спостереженні малорозмірних цілей на морському фоні / Микитенко В.І., Подрига С.І. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2011. - №2(38). С.56 – 59. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, Index Copernicus).

Особистий внесок: запропоновано спосіб просторової фільтрації сигналу ФЦО з використанням попередньо визначеної дальності виявлення об'єкта.

33. Микитенко В.І. Оцінка показників якості комплексованих зображень в двоканальних ОЕСС / Рибалко М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. // Вісник

ЧДТУ. - 2011. - №4. - С.57 - 62. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Academic Resource Index, WorldCat, CrossRef, Ulrich's Directory).

Особистий внесок: виготовлено макет двоканальної ОЕСС, з допомогою якої отримано серію зображень й проведено суб'єктивну експертизу їх якості.

34. Микитенко В.І. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації / Колобродов В.Г., Мамута М.С., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2012. - №6(86). - С.127 - 131. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

Особистий внесок: запропоновано метод визначення показника ТТР для багатоканальних ОЕСС з комплексуванням зображень.

35. Микитенко В.І. Удосконалення розрахунку мінімальної роздільної різниці температур медичного тепловізора / А.М.Л. Аль-Мзіраві, Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2014. - №5 (97). - С.96 - 100. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

Особистий внесок: теоретично та експериментально досліджено мінімальну роздільну різницю температур тепловізора Thermal Eye TSC.

36. Микитенко В.І. Комплексування зображень у цілодобових двоканальних системах спостереження / Микитенко В.І., Балтабаєв М. М., Пономаренко О. А. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.- 2014. – Вип. 48. – С. 43 – 49. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Особистий внесок: запропоновано спрощену модель утворення оптичного випромінювання в видимому та ІЧ діапазонах.

37. Микитенко В.И. Расчет минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных приборов / Ахмед М.Л. Аль-Мзирави, Колобродов В.Г., Микитенко В.И. // Приборы и методы измерений. - 2015 г., № 1(10). - С.64 - 69. (Закордонне видання, індексується в наукометричних базах Web of Science Core Collection, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).

Особистий внесок: виконано порівняння формул для розрахунку мінімальної роздільної різниці температур для різних апроксимацій модуляційної передавальної функції зорової системи спостерігача.

38. Микитенко В.І. Метод комплексування даних з попереднім знаходженням інформативної області сцени / Плотніков О.М., Микитенко В.І. // Вісник Хмельницького національного університету. - 2017. - №1(245). - С.196 - 201. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, Index Copernicus, eLibrary.ru, Polish Scholarly Bibliography).

Особистий внесок: запропоновано створювати карту інформативності при комплексуванні спектральних каналів по зображенню низької роздільної здатності.

39. Mykytenko V. I. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System's Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles / Kolobrodov, V. H., Lykholit, M. I., Mykytenko, V. I., Tiagur, V. M., Dobrovolska, K. V. // Visnyk NTUU KPI. Seriiia Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia. - 2017. - Iss. 69. - PP.30-34. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).

Особистий внесок: запропонована спрощена модель розрахунку енергетичного розділення OECC космічного базування видимого діапазону спектра.

40. Mykytenko V.I. Physical and mathematical model of the digital coherent optical spectrum analyzer / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchik, V.I. Mykytenko, M.S. Kolobrodov // Optica Applicata. - 2017. - (Vol.47), No.2. - PP.273-282. (Закордонне видання, індексується в наукометричних базах Scopus, SciFinder, Compendex, Web of Science).

Особистий внесок: проаналізовано вплив оптичного когерентного процесора на спектр зображень при їх обробці в OECC з матричними приймачами випромінювання.

41. Mykytenko V. I. Influence of the Matrix Structure of the Modulator and Detector on the Optical Spectrum Analyzer Output Signal / Kolobrodov, V. H., Tymchik, G. S., Mykytenko, V. I., Kolobrodov, M. S., Lutsiuk, M. M. // Visnyk NTUU KPI Seriiia.

Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia. – 2018. - Iss. 72. - PP.78 -85. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).

Особистий внесок: досліджено вплив параметрів матричного приймача випромінювання на функцію передачі сигналу когерентного спектроаналізатора.

42. Микитенко В.І. Порівняння якості роботи фільтрів для зменшення шумів зображень тепловізійного каналу оглядових оптико-електронних пристроїв / Балахонова Н. О., Микитенко В. І., Пашков Р. А. // Вісник КПІ. Серія приладобудування. - 2019. - Вип. 57(1). - С.26 – 35. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Особистий внесок: сформульовано задачу й вихідні дані попереднього фільтрування зображень в ОЕСС з комплексуванням.

43. Микитенко В. І. Патент на винахід 78609 Україна, МПК G01J1/10, F21V 9/00. Дифузний випромінювач / Міхеєнко Л.А., Колобродов В.Г., Микитенко В. І., Петрущенко Л.А., Гайворонська Г.О.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». - №a200504103; заявл. 28.04.2005; опубл. 10.04.2007, бюл. №4.

Особистий внесок: обґрунтовано отримання корисного ефекту при виключенні площі поверхні діафрагми з регульованим діаметром отвору із загальної площі оптично-спряжених фотометричних куль.

44. Микитенко В.І. Патент на корисну модель №82581, МПК G06T 5/50 (2006.01) / Спосіб комплексування в двоканальних іконічних системах / Мамута М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. // Заявлено 21.03.2013; Опубл. 12.08.2013, Бюл. №15, 2013 р.

Особистий внесок: запропоновано формувати карту інформативності на основі показника успішності виконання завдання.

45. Mykytenko V. I. Refinement of thermal imager minimum resolvable temperature difference calculating method / Mykytenko V. I., Kolobrodov V. G. // Proc. SPIE 9809, Twelfth International Conference on Correlation Optics, 98090C (November 30, 2015); doi:10.1117/12.2228532. (Закордонне видання, індексується в наукометричних базах Web of Science, Scopus, Ei Compendex, Inspec, Google Scholar, Astrophysical

Data System (ADS), CrossRef).

Особистий внесок: уточнено розрахунок коефіцієнту смуги пропускання OECC з використанням моделі Ніла для апроксимації зорової системи.

46. Mykytenko V. I. Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles / Valentin G. Kolobrodov; Catherine V. Dobrovolska; Volodymyr I. Mykytenko; Grygorij S. Tymchik; Volodymyr M. Tiagur; Paweł Komada; Assel Mussabekova; Aliya Targeusizova; Aigul Iskakova // Proceedings of SPIE V. 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High Energy Physics Experiments 2017; 104450J (2017); doi: 10.1117/12.2280909. (Закордонне видання, індексується в наукометричних базах Web of Science, Scopus, Ei Compendex, Inspec, Google Scholar, Astrophysical Data System (ADS), CrossRef).

Особистий внесок: запропоновано розрахункову формулу для визначення модуляційної передавальної функції вхідного блоку OECC при похилих кутах візування.

47. Mykytenko V. I. Substantiation of a university nanosatellite television camera parameters / Valentin Kolobrodov, Volodymyr Mykytenko, Vyacheslav Sokurenko, Andrzej Smolarz, Assel Mussabekova, Samat Sundetov, Zhanar Azeshova // Proceedings of SPIE. Volume 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018; 1104512 (2019); doi: 10.1117/12.2522404. (Закордонне видання, індексується в наукометричних базах Web of Science, Scopus, Ei Compendex, Inspec, Google Scholar, Astrophysical Data System (ADS), CrossRef).

Особистий внесок: запропоновано методику моделювання системи «земна поверхня – атмосфера – телевізійна камера», яка дозволяє забезпечити задане просторове розділення на поверхні Землі.

48. Mykytenko V. I. University Nanosatellite Television Camera / V. Mykytenko, V. Kolobrodov, O. Lysenko, V. Sokurenko // IEEE Conference Proceedings. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kyiv, 2019. - PP. 543-547. (Закордонне видання, індексується в наукометричних базах Scopus, Web of Science, Google Scholar).

Особистий внесок: запропоновано метод узгодження параметрів об'єктива

та матричного приймача випромінювання для телевізійної камери дистанційного спостереження.

49. Микитенко В.І. Стендовая аппаратура для измерения энергетических характеристик сканирующих устройств космического базирования / Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. // Перша науково-технічна конференція «Приладобудування 2002: підсумки і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2002. - С.52.

Особистий внесок: обґрунтовано параметри основних блоків стенду для вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС.

50. Микитенко В.І. Установка для аттестации космических систем зондирования Земли / Колобродов В.Г., Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. // II науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22 –23 квітня 2003 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2003. - С.34-35.

Особистий внесок: виконано аналіз доступної елементної бази для вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС в видимому та ближньому ІЧ діапазонах.

51. Микитенко В.І. Моделирование работы оператора в поисково-прицельных оптических и оптико-электронных системах / Микитенко В.І. // II науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22–23 квітня 2003 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2003. - С.55.

52. Микитенко В.І. Моноблочный телескопический визир малого увеличения / Сенаторов Н.В., Микитенко В.І. // III науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (20 - 21 квітня 2004 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2004. - С.54-55.

Особистий внесок: проведено аналіз критеріїв оцінки якості візуального сприйняття тепловізійних зображень.

53. Микитенко В.І. Особенности измерения энергетических характеристик космических оптико-электронных сканеров / Колобродов В.Г., Міхеєнко Л.А.,

Микитенко В.И. // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (20-21 квітня 2004 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КП», Приладобудівний факультет. - Київ, 2004. - С.55-56.

Особистий внесок: досліджено фотометричні характеристики інтегрального випромінювача для вимірювання функції передачі сигналу ОЕСС.

54. Микитенко В.И. Метрологическое обеспечение энергетической аттестации оптикоэлектронных систем зондирования Земли / Колобродов В.Г., Михеенко Л.А., Микитенко В.И. // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (26-27 квітня 2005 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КП», Приладобудівний факультет. - Київ, 2005. - С.54.

Особистий внесок: проаналізовано методи створення змінної яскравості в вимірювальних стендах.

55. Микитенко В.И. Анализ задач визуального поиска и распознавания / Микитенко В.И. // V Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (25-26 квітня 2006 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КП», Приладобудівний факультет. - Київ, 2006. - С.78-79.

56. Микитенко В.И. Оцінка якості комплексування зображень в багатоканальних оптико-електронних системах / Микитенко В.И. // V Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (25–26 квітня 2006 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КП», Приладобудівний факультет. - Київ, 2006. - С.79-80.

57. Микитенко В.И. Покращення роздільної здатності зображення при дистанційному спостереженні земної поверхні з рухомої платформи / Микитенко В.И., Рибалка М.С. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КП», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С.54 - 55.

Особистий внесок: запропоновано використання неконтрольованого мікросканування для усунення змазу зображення й підвищення його просторового розділення.

58. Микитенко В.И. Модель оптичного зображення для комплексування у

багатоканальних оптико-електронних системах / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С. 56 - 57.

Особистий внесок: запропонована спрощена модель формування зображень в двоканальних ОЕСС.

59. Микитенко В.І. Створення оптико-електронного блоку цифрової кадрової фотокамери космічного базування / Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Бараненко І.В. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С. 52 - 53.

Особистий внесок: запропоновано спосіб оцінки якості космічних зображень.

60. Микитенко В.І. Метод функціональної діагностики стану мікросудинної системи на основі обміну кисню та теплового випромінювання / Котовський В.Й., Ройтман Е.М., Микитенко В.І. // XXVII Международная научно-техническая конференция «Проблемы электроники», ч. 2. Сборник тезисов докладов / НТУУ «КПІ», Факультет електроніки. - Киев, 2007. – С.83-85.

Особистий внесок: запропоновано використовувати тепловізори для вимірювання температур при контролі капілярного кровоплину на шкіряних покровках.

61. Микитенко В.І. Комплексування зображень при денних дистанційних спостереженнях / Микитенко В.І. // VII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22-23 квітня 2008 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2008. - С.66.

62. Микитенко В.І. Покращення роздільної здатності зображень при дистанційному спостереженні Землі в умовах вібрацій / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Перша студентська науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (23 квітня 2008 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2008. - С.18.

Особистий внесок: запропоновано алгоритм послідовного комплексування в одному спектральному каналі для підвищення просторового розділення зображення.

63. Микитенко В.І. Підвищення просторового розділення оптико-електронної системи спостереження за рахунок коливань платформи / Микитенко В.І. // Перша Всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (3-5 червня 2008 р.). Збірник тез доповідей / КП СПБ «Арсенал». - Київ, 2008. - С.45 - 46.

64. Микитенко В.І. Обґрунтування параметрів оптико-електронної системи спостереження для мікросупутників / Тимчик Г.С., Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Перша Всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (3-5 червня 2008 р.). Збірник тез доповідей / КП СПБ «Арсенал». - Київ, 2008. - С. 47 - 48.

Особистий внесок: запропоновано вирішення задачі узгодження об'єктива ОЕСС і приймача випромінювання по критерію просторового розділення.

65. Микитенко В.І. Використання об'єктивів змінного збільшення в двоканальних ОЕСС Микитенко В.І., Котовський В.Й. // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (28-29 квітня 2009 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет.- Київ, 2009.- С.43.

Особистий внесок: розроблено розрахункову модель для оцінки ефективності пошуку/виявлення та розпізнавання об'єктів двоканальними ОЕСС з об'єктивами різних полів зору.

66. Микитенко В.І. Стратегія комплексування відео зображень / Микитенко В.І. // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (27-28 квітня 2010 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2010. - С.61 - 62.

67. Mykytenko V. A new approach to information fusion in optoelectronic surveillance systems / Rybalko M., Mykytenko V. // 11-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2010

(October 21-24). - Kyiv, 2010.

Особистий внесок: запропоновано новий алгоритм побудови карти інформативності.

68. Микитенко В.І. Оцінка ефективності двоканальної ОЕСС з функцією комплексування інформації / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2012. - С.72 - 73.

Особистий внесок: запропоновано використання показника успішності виконання завдання для оцінки якості комплексованих зображень.

69. Микитенко В.І. Вплив оптичних характеристик поверхонь об'єкту на аналіз його теплового стану/ Микитенко В.І. // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2012. - С.64.

70. Микитенко В.І. Оцінка ефективності двоканальної ОЕСС з комплексуванням інформації за різних зовнішніх умов функціонування / Мамута М. С., Мамута О. Д., Микитенко В.І. // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2013. - С.66-67.

Особистий внесок: досліджено ефективність двоканальної ОЕСС з комплексуванням інформації за різних погодних умов функціонування.

71. Mykytenko V. Image fusion for surveillance applications: state of the art and new aspects / Mykytenko V. // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2014. - С.53-54.

72. Микитенко В.И. Моделирование и разработка многоканальных средств диагностики состояния человека на основе анализа его инфракрасного излучения / Микитенко В.И. // Материали за 10-а международна научна практична конференция «Динамиката на съвременната наука». Том 11. Технологии. «Бял ГРАД-БГ» ООД. - София, 2014. - С.49 - 53.

73. Mykytenko V. The impact of phase distortions in matrix imagers with information fusion on image quality / Mykytenko V. // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2015. - С. 50.

74. Микитенко В.І. Визначення ефективності оглядових оптико-електронних систем безпілотних літальних апаратів / Микитенко В.І. // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2016. - С.51 - 52.

75. Микитенко В.І. Імплементация багатоспектральних ОЕСС на FPGA / Плотніков О.М., Микитенко В.І. // X науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування». Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2017. - С. 40.

Особистий внесок: виконано порівняння методів комбінування зображень різних полів зору на одному кадрі – за рахунок комплексування та шляхом врізки.

76. Mykytenko V. Infrared surveillance imager's application / Mykytenko V. // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». - КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2018. - С. 51 - 52.

77. Микитенко В.І. Оптико-електронна система спостереження для наземної техніки / Микитенко В.І., Пашков Р.А. // XI науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (15-16 травня 2018 р.). КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2018. - С. 159-162.

Особистий внесок: досліджено точність суміщення візирних осей в різних компоновках багатоканальних ОЕСС.

78. Микитенко В.І. Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень / Микитенко В.І. // Третя Українська науково-технічна конференція «Спеціальне

приладобудування: стан і перспективи» (4-5 грудня 2018 р.), КП СПБ «Арсенал».
- Київ, 2018. - С. 55 - 58.

79. Mykytenko V. Dual-band surveillance imagers evaluation / Mykytenko V. // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2019. - С. 50 - 51.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	33
ВСТУП	40
РОЗДІЛ 1 ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕНЬ	51
1.1 Місце ОЕСС в загальному інформаційному середовищі «фоноцільова обстановка - ОЕСС - оператор»	52
1.2 Основні типи ОЕСС з комплексуванням зображень	59
1.2.1 ОЕСС з оптико-електронними каналами	64
1.2.2 ОЕСС з оптичними та оптико-електронними каналами	70
1.2.3 ОЕСС з оптико-електронними та неоптичними каналами	73
1.3 Комплексування інформації при візуальних спостереженнях	75
1.3.1 Послідовне комплексування інформації в ОЕСС	78
1.3.2 Комплексування інформації в багатоканальних ОЕСС	84
1.4 Програмні й апаратні методи об'єднання зображень	85
1.4.1 Комплексування на рівні пікселів	95
1.4.2 Комплексування на рівні ознак	96
1.4.3 Комплексування на рівні прийняття рішень	97
1.4.4 Оптичні методи комплексування	98
1.5 Узгодження елементів ОЕСС і каналів ОЕСС з комплексуванням ..	98
Висновки до розділу 1	99
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛАХ ОЕСС І АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕННЯ СПОСТЕРІГАЧЕМ	101
2.1 Моделі формування інформації в окремих каналах ОЕСС	102
2.1.1 Утворення оптичного сигналу	106
2.1.2 Перетворення оптичного сигналу на трасі розповсюдження	114
2.1.3 Формування зображення на приймачі випромінювання	117
2.1.4 Перетворення оптичного сигналу в електричний	127
2.1.5 Обробка електричного сигналу в інформаційних каналах	138

2.1.6 Формування зображення в полі зору оператора	141
2.2 Комплексування спектральних каналів	144
2.3 Особливості зорового сприйняття зображень, отриманих в ОЕСС з комплексуванням	145
Висновки до розділу 2	153
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ «ФОНОЦІЛЬОВА ОБСТАНОВКА – ОЕСС – ОПЕРАТОР»	155
3.1 Загальні підходи до визначення ефективності ОЕСС	156
3.2 Оцінки просторового розділення ОЕСС	163
3.3 Оцінки енергетичного розділення	166
3.3.1 Освітленість, що еквівалентна шуму	173
3.3.2 Еквівалентна шуму різниця температур	177
3.3.3 Мінімально виявлювальна різниця температур	180
3.4 Мінімальна роздільна різниця температур	182
3.5 Ймовірнісні оцінки	190
3.6 Споживчі характеристики ефективності	193
3.7 Оцінювання ефективності комплексування зображень в ОЕСС	194
3.8 Новітній метод оцінки ефективності ОЕСС на основі показника успішності виконання завдання	200
Висновки до розділу 3	204
РОЗДІЛ 4 МЕТОДОЛОГІЯ УЗГОДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛІВ ОЕСС	206
4.1 Узгодження приймальних блоків спектральних каналів	206
4.1.1 Узгодження елементів вхідного блоку в межах спектрального каналу	207
4.1.2 Узгодження параметрів об'єктів двоканальної ОЕСС	212
4.2 Узгодження геометричних параметрів малогабаритних прицільних ОЕСС	217
4.2.1 Коліматорні ОЕСС	217
4.2.2 Телескопічні ОЕСС	235
4.3 Узгодження полів зору в ОЕСС з оптичним каналом	246

Висновки до розділу 4	250
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЕСС	252
5.1 Елементна база вимірювального стенду	253
5.2 Вимірювання функції передачі сигналу	257
5.3 Вимірювання спектральної характеристики	269
5.4 Вимірювання зонної характеристики	270
5.5 Вимірювальний стенд	274
5.6 Похибки вимірювань	281
Висновки до розділу 5	283
РОЗДІЛ 6 КОМПЛЕКСУВАННЯ ТА ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ ЗА РІЗНИХ УМОВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ	285
6.1 Стратегія комплексування інформації в ОЕСС дистанційного спостереження	285
6.2 Реєстрація зображень в спектральних каналах	286
6.3 Паралельне комплексування зображень в ОЕСС	293
6.3.1 Дослідження методів комплексування спектральних каналів	295
6.3.2 Створення карти інформативності в багатоканальних ОЕСС	298
6.3.2 Використання когерентно-оптичного процесора для визначення просторово-частотного спектру ФЦО	309
6.4 Послідовне комплексування при вібраціях і зсувах	313
6.5 Новий метод комплексування	320
Висновки до розділу 6	334
ВИСНОВКИ	336
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	339
ДОДАТОК А ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	369
ДОДАТОК Б СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	376

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

<i>DMRTD</i>	динамічна мінімальна роздільна різниця температур
<i>IHS</i>	метод «інтенсивність – тон – насиченість»
<i>MDTD</i>	мінімальна виявлювана різниця температур
<i>MRLD</i>	мінімальна роздільна різниця яскравості
<i>MRTD</i>	мінімальна роздільна різниця температур
<i>NEI</i>	освітленість, що є еквівалентною шуму
<i>NETD</i>	різниця температур, що є еквівалентною шуму
<i>NET</i>	еквівалентна шумова температура
<i>NEP</i>	потужність, що є еквівалентною шуму
<i>NPS</i>	шумовий спектр потужності
PCA	аналіз головних компонентів
RGB	метод композитних кольорів
TDI	часове інтегрування сигналу
<i>TTP</i>	показник успішності виконання завдання
АСП	авіаційний стрілецький приціл
АЧТ	абсолютно чорне тіло
ВГ	візирна головка
Вт	Ватт
ГОЕ	голографічний оптичний елемент
Гц	Герц
ДВ	джерело випромінювання
ДВЗЯ	дифузний випромінювач змінної яскравості
Дж	Джоуль
ДфВ	дифузний випромінювач
ІЧ	інфрачервоний
кд	кандела
КМОН	комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник
КОП	когерентно-оптичний процесор

КП	коліматорний приціл
лк	люкс
лм	люмен
мкм	мікрометр
мм	міліметр
МПВ	матричний приймач випромінювання
МПФ	модуляційна передавальна функція
мрад	мілірадіан
ОЕСС	оптико-електронна система спостереження
ОС	оптична система
ПВ	приймач випромінювання
ПЗЗ	прилад з зарядовим зв'язком
ПЧМС	просторово-часовий модулятор світла
СЩЕЯ	спектральна щільність енергетичної яскравості
ТВ	телевізійний
ТП	телескопічний приціл
ТПВ	тепловізійний
ФПК	функція порогового контрасту
ФПС	функція передачі сигналу
ФЦО	фоно-цільова обстановка

A_D	площа пікселя ПВ
A_p	площа входної зіниці об'єктива ОЕСС
A_t	площа об'єкту
c	швидкість світла у вакуумі
D_p	зовнішній діаметр входної зіниці
D_i	внутрішній діаметр входної зіниці
D	виявлювальна здатність ПВ
D^*	питома виявлювальна здатність ПВ
E_e	інтегральна освітленість в площині об'єкта

$E(\lambda)$	спектральна енергетична освітленість
E_n	освітленість, що є еквівалентною шуму
f_d	тактова частота зчитування
f_f	частота кадрів
f_{max}	частота зрізу
f'_e	фокусна відстань окуляра
f'_o	фокусна відстань об'єктива
$F\{*\}$	оператор Фур'є-перетворення
α_t	коефіцієнт теплопровідності
H	висота траси
h	постійна Планка
H_n	експозиція, що є еквівалентною середньому квадратичному значенню шуму
$h_{sa,c}(v_x, v_y)$	когерентний імпульсний відгук
$I(x, y, t)$	інтенсивність пікселя зображення
$I_c(\lambda)$	сила випромінювання
k_D	коефіцієнт перетворення зміни температури чутливого елемента
k	постійна Больцмана
$k_{\Delta f}$	коефіцієнт ширини смуги
k_{eff}	ефективне діафрагмове число
l_D	довжина лінійки ПВ
j_n	середня щільність темнового струму
l_{tel}	довжина труби прицілу
L_{et}	енергетична яскравість об'єкта
L_t	яскравість об'єкта
L_b	яскравість фону
L_q^{CT}	число фотонів

L_M	середня яскравість екрана монітора
M_A	модуляційна передавальна функція атмосфери
M_O	модуляційна передавальна функція ОС
M_D	модуляційна передавальна функція ПВ
M_M	модуляційна передавальна функція монітора
M_E	модуляційна передавальна функція спостерігача
M_V	модуляційна передавальна функція руху платформи
$M(\lambda)$	спектральна енергетична світність випромінювання
$M_{El}(f)$	модуляційна передавальна функція електронного тракту ОЕСС
$M_s(v_x)$	модуляційна передавальна функція вхідного блоку ОЕСС
$M(\lambda, T)$	поверхнева щільність випромінювання
M_{Ds}	просторова модуляційна передавальна функція приймача випромінювання
M_{Dt}	часова модуляційна передавальна функція приймача випромінювання
M_{Dsd}	модуляційна передавальна функція просторової вибірки приймача випромінювання
$M_{tp,E}$	функція передачі контрасту тепловізійного каналу
$M_E(v_x)$	одномірна модуляційна передавальна функція зорової системи
N_D	кількість пікселів приймача випромінювання
$\tilde{q}(v_x, v_y)$	просторово-частотний спектр сигналу приймача випромінювання
$p \times q$	формат кадру
P_d	ймовірність виявлення об'єкта
P_{ot}	ймовірність пропуску об'єкта
P_{to}	ймовірність хибної тривоги
r_i	радіус кривизни заломлюючої поверхні

$r_{k,l}^F$	кореляція Пірсона
R	відстань до об'єкта
R_d	дальність виявлення
R_i	дальність ідентифікації
R_r	дальність розпізнавання
R_{ME}	відстань між екраном і зорової системою
R_D	чутливість приймача випромінювання
$R_D(f)$	частотна характеристика чутливості приймача випромінювання
$R_D(\lambda)$	спектральна чутливість приймача випромінювання
R_l	конфокальний параметр
$Q^{AB/F}$	показник Петровіка
SD	стандартне відхилення зображення
R_D	чутливість приймача випромінювання
t	віддалення вихідної зіниці
t_d	час фіксації виявлення об'єкта спостерігачем
t_E	постійна часу зорової системи;
t_i	час інтегрування
T_t	температура об'єкта
T_D	температура приймача випромінювання
T_t	температура поверхні об'єкта
$u_{IR}(t)$	сигнал на виході ТПВ каналу
$U_n(f)$	спектральна щільність потужності шумів
\vec{V}	швидкість зображення
$V(\lambda)$	спектральна чутливість ока
$V(x, y)$	амплітуда світлового поля
$V_D \times W_D$	розмір чутливої площадки приймача випромінювання

$V_m \times W_m$	період матричної структури модулятора
$\alpha(\lambda)$	спектральний коефіцієнт поглинання
$\alpha_D \times \beta_D$	кутові розміри пікселя приймача випромінювання
β	кутове збільшення
β_{El}	електронне збільшення
γ_t	кутовий розмір цілі
γ_D	коефіцієнт поглинання матеріалу чутливого елемента
γ_p	піроелектричний коефіцієнт
Γ_s	кутове збільшення ОЕСС
Γ^x	видиме збільшення
$\delta(\nu)$	дельта-функція
δ	похибка вимірювання
δ_E	похибка лінії прицілювання
$\delta V \times \delta W$	розмір елемента розділення на поверхні Землі
Δf	ефективна шумова смуга
Δl_D	відстань між центрами пікселів приймача випромінювання
$\Delta \rho_{tb}$	контраст коефіцієнта відбиття об'єкта на фоні
$\Delta \rho_n$	радіометричне розділення
ΔT	температурний контраст
Λ_p	порогове відношення правдоподібності
$\varepsilon(\lambda)$	спектральний коефіцієнт випромінювання
$\varepsilon_t(\lambda)$	спектральний коефіцієнт випромінювання об'єкта
η_D	квантова ефективність чутливого елемента ПВ
$\eta_D(\lambda)$	квантова ефективність приймача випромінювання
θ_l	кут розбіжності лазерного пучка
θ_v	кут візування

Θ	кут нахилу траси відносно горизонту
λ	довжина хвилі
μ	відношення сигнал/шум
μ_M	відношення сигнал/шум на екрані монітора
μ_E	відношення сигнал/шум на екрані, що сприймається оператором
μ_K	контрастне відношення сигнал/шум
ν_N	частота Найквіста
ν_x, ν_y	просторові частоти
ξ_{tp}	кутовий розмір штриха тестової міри
$\xi_{tx}'' \times \xi_{ty}''$	кутовий розмір зображення об'єкта на екрані монітора
ρ_b	альбедо фону
ρ_t	коефіцієнт відбиття поверхні об'єкта
σ^2	дисперсія
σ_{SB}	постійна Стефана – Больцмана
σ_{Dn}	середньоквадратичне відхилення темнових зарядів
$\tau_A(\lambda)$	спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери
$\tau_{Ai}(\lambda)$	спектральний коефіцієнт пропускання i -го шару атмосфери
$\tau_o(\lambda)$	спектральний коефіцієнт пропускання каналу
φ	зенітний кут Сонця
ϕ_i	питома вага скла
ψ''	роздільна здатність прицілу
Φ_S	сонячний потік що падає на об'єкт
ω	часова частота
$2\omega_0$	кутове поле зору ОЕСС
Ω_o	тілесний кут поля зору ОЕСС

ВСТУП

Актуальність теми. Порівняно з радіолокаційними системами оптико-електронні системи спостереження (ОЕСС) забезпечують суттєво більшу точність при менших габаритах і помітності. Тому дистанційні спостереження в оптичному діапазоні спектру набули величезної популярності в світі. Стандартним складом бортових ОЕСС дистанційного зондування Землі стало поєднання панхроматичного і кількох спектральних (у тому числі – інфрачервоного (ІЧ) діапазону спектру) каналів телевізійного типу. В таких системах виконується комплексування інформації різних каналів, що дозволяє отримувати величезну кількість інформації про стан підстиляючої поверхні майже в реальному масштабі часу. Останніми роками унікальні і дорогі технічні рішення, які були характерними для космічних ОЕСС дистанційного зондування Землі, почали адаптуватись для інших галузей життєдіяльності людини – насамперед – авіаційних і наземних спостережень в військових задачах і екологічного моніторингу. Цей процес розширюється і потребує вирішення багатьох наукових і технологічних проблем. При цьому на тлі підвищення вимог до технічних характеристик бортової апаратури першочерговими стали питання економічної ефективності технічних рішень, обґрунтованості фінансових витрат на проектування, виготовлення та експлуатацію апаратури.

Практика сьогодення і аналіз найближчих перспектив показали, що для забезпечення достатньої ефективності функціонування наземних і авіаційних ОЕСС за навколишнім середовищем при мінімальних фінансових витратах в більшості випадків достатньо мати два інформаційні канали – телевізійний (ТВ) і тепловізійний (ТПВ). Іноді доцільно забезпечити можливість роботи ТВ каналу за умов низького рівня освітлення або розділити робочий видимий діапазон спектру на кілька піддіапазонів. Споживачем інформації, яка формується ОЕСС, є людина-оператор, що потребує першочергового врахування і фактично впливає на всю ідеологію побудови інформаційної системи. В будь-якому випадку обов'язковою передумовою створення ефективної і в споживчому, і в технічному плані

багатоканальної ОЕСС є узгодження інформаційних каналів між собою, із джерелами та споживачем інформації з врахуванням поточної задачі. Таке узгодження проводиться на апаратному та програмному рівнях. Причому апаратне узгодження – особливо для ІЧ діапазону спектру – є обмеженим номенклатурою та параметрами блоків ІЧ приймачів випромінювання, які серійно випускаються. Значно більше можливостей програмного впливу на інформацію, яка формується в ОЕСС. Отже створення ефективної ОЕСС передбачає об'єднання зусиль фахівців різних галузей – розробників основних блоків ТВ і ТПВ ОЕС, спеціалістів з обробки зображень, психофізіологів.

В світі існують декілька провідних виробників ІЧ приймачів випромінювання та ТПВ систем: Raytheon Commercial Infrared, Raytek (Fluke Corp.), Flir Systems Inc. (США), NEC Avio Infrared Technologies Co. (Японія), IRISYS (Великобританія). Вони орієнтовані на створення здебільшого універсальних технічних рішень і тільки невеликої кількості спеціалізованих, наприклад, для медицини, мікроелектроніки, будівництва. Ґрунтовно опрацьовано теорію проектування ОЕС різних спектральних діапазонів (Hudson R., Hadni F., Jamieson J., Lloyd J., Мірошніков М.М., Якушенков Ю.Г., Порфір'єв Л.Ф., Колобродов В.Г. та ін.). Багато років плідно працює вітчизняна наукова школа розрахунків ТВ та ТПВ ОЕС, започаткована Колобродовим В.Г. Також великий обсяг досліджень виконано в галузі комплексування зображень (image fusion) в спектральних каналах ОЕСС та психофізіології зорового сприйняття. Також здійснюються спроби підвищення ефективності функціонування ОЕСС за рахунок застосування єдиного підходу до проектування всіх ланок інформаційного комплексу багатоспектрального моніторингу оточуючого середовища при виконанні конкретних завдань, які достатньо просто формалізуються, наприклад, в автоматизованих комплексах керування автомобілем (компанія BMW, Німеччина).

Однак, досі немає єдиної технології проектування ОЕСС, яка б дозволяла наскрізно аналізувати всю інформаційну систему та формувати технічні вимоги до окремих блоків спектральних каналів і алгоритмів комплексування зображень в них виходячи з контексту виконуваного спостерігачем завдання і виду фоно-

цільової обстановки. Невирішеною залишаються низка питань, пов'язаних із підвищенням ефективності ОЕСС шляхом формування в полі зору оператора зображення, зміст якого найкращим чином забезпечує вирішення поточної задачі спостереження.

Виходячи з викладеного, можна констатувати, що дослідження, які спрямовані на підвищення ефективності ОЕСС з комплексуванням зображень, вирішують актуальну проблему, яка має наукове та практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота є результатом науково – дослідних робіт, які виконано в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за участю автора як відповідального виконавця згідно з:

- тематикою державних науково-дослідних робіт: «Теоретичне обґрунтування та дослідження оптико-електронних систем спостереження» (ДР № 0105U000928); «Розробка методів обробки сигналів інфрачервоних датчиків для покращення виявлення цілей оптико-електронними системами спостереження» (ДР №0110U002422); «Розробка комплексу багатоспектрального моніторингу навколишнього середовища для запобігання аваріям, надзвичайним ситуаціям і ліквідації їх наслідків» (ДР №0112U001489); «Теоретичне обґрунтування принципів створення багатоканальних оптикоелектронних систем» (ДР №0103U000294); «Методи підвищення якості зображень в матричних іконічних оптико-електронних системах» (ДР №0106U002188); «Розробка теоретичних основ проектування тепловізорів різного призначення» (ДР №0100U002035); «Розробка концепції побудови сучасних оптикоелектронних систем наведення» (ДР №0102U000582); «Покращення функціонально-тактичних характеристик наземних оптико-електронних систем спостереження і наведення» (ДР №0108U000502); «Розробка методів і розрахункового інструментарію для об'єктивної оцінки просторового і енергетичного розділення космічних інфрачервоних камер дистанційного зондування Землі» (ДР №0114U003421); «Оптико-цифровий

процесор для обробки зображень в тепловізійних системах спостереження» (ДР № 0118U002070); «Математичне моделювання та розробка засобів діагностики стану людини на основі аналізу інфрачервоного випромінювання патогенних зон» (ДР №0115U000354); «Тепловізійні системи спостереження безпілотних авіаційних та космічних апаратів» (ДР №0116U003689); «Розроблення нових критеріїв якості зображення тепловізійних систем спостереження різного призначення і апаратури для їх визначення» (ДР №0117U002300);

- тематикою госпдоговірних робіт: «Критерії якості зображення в космічних сканерах високого розділення» (ДР №0107U009732); «Розробка методик розрахунку просторового і енергетичного розділення ІЧ камери космічного базування з мікроболометричною матрицею» (ДР №0113U007673); «Аванпроект зі створення сканера надвисокої роздільної здатності. Складова частина: розробка матеріалів у частині когерентного цифрового оптико-електронного процесора (ЦОЕП) для обробки космічних знімків»; «Розробка алгоритмів обробки сигналів ІЧ датчика та виявлення цілей» (шифр «Селена-Ц»); «Тепловізійні системи спостереження» (ДР №0114U006375).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення наукової проблеми підвищення ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень на основі створення на єдиних методологічних засадах наукових основ і прикладних методів аналізу, проектування та узгодження інформаційних каналів.

Поставлена мета досягається вирішенням таких задач:

1. На основі порівняльного аналізу сучасного стану ОЕСС з комплексуванням зображень обґрунтування наукового підходу до вирішення проблеми підвищення ефективності їх функціонування.
2. Розвинення теорії та методів описання процесів перетворення видимого та інфрачервоного випромінювання від ФЦО до ОЕСС з подальшим сприйняттям комплексованого зображення спостерігачем для його інтерпретації.
3. Дослідження методів оцінки ефективності функціонування інформаційної системи «ФЦО - ОЕСС - оператор» та оцінки якості комплексування зображень.

Розроблення методу оцінювання ефективності ОЕСС з комплексуванням зображень.

4. Розроблення методів узгодження спектральних каналів ОЕСС для забезпечення максимальних ймовірностей виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів виходячи із запропонованого механізму оцінювання ефективності системи «ФЦО - ОЕСС - оператор».

5. Розроблення адаптивного методу комплексування зображень в багатоканальних ОЕСС, який забезпечує найбільшу ефективність виконання поточної задачі спостереження.

6. Удосконалення методів експериментального вимірювання основних характеристик спектральних каналів ОЕСС.

7. Експериментальне дослідження дієвості запропонованих технічних рішень на макеті двоканальної ОЕСС з послідовним та паралельним способами комплексування зображень.

Об'єктом дослідження є процес формування та інтерпретації візуальної інформації при дистанційних спостереженнях в видимому та інфрачервоному (ІЧ) діапазонах спектру за допомогою ОЕСС.

Предметом дослідження є методи підвищення ефективності функціонування ОЕСС.

Методи дослідження базуються на системному підході, включають теоретичні та експериментальні складові. В теоретичних дослідженнях використано математичні основи теорій лінійних систем, оптично-електронних приладів, методи статистичного аналізу і обробки експериментальних даних. Експериментальні дослідження виконувались з допомогою телевізійного та тепловізійного обладнання, а також комп'ютерної техніки в лабораторних і польових умовах. При комп'ютерному моделюванні використовувався розрахункові пакети «MathCad» і «Matlab».

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

1. Запропоновано та науково обґрунтовано новий методологічний підхід до підвищення ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням зображень,

який включає методи конструктивного узгодження характеристик основних блоків ОЕСС та механізм адаптивного вибору найкращого методу злиття зображень спектральних каналів для забезпечення найбільш якісного виконання поточної задачі спостереження оператором.

2. Уточнено математичну модель опису формування й перетворення інформації в телевізійному та тепловізійному каналах ОЕСС шляхом врахування впливу кутів нахилу візирної вісі на просторове та енергетичне розділення, що дозволяє більш точно виконувати задачі аналізу та оптимізації ОЕСС дистанційного зондування.

3. Вперше розроблено метод оцінки ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням інформації, який поєднує узагальнені споживчі характеристики ОЕСС - ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта - з показником візуальної якості комплексованого зображення.

4. Вперше запропоновано метод узгодження параметрів оптичних систем спектральних каналів двоканальних ОЕСС з використанням показника успішності виконання завдання, який забезпечує найбільшу ймовірність виконання поточної задачі спостереження.

5. Вперше розроблено єдиний механізм оцінювання якості зображень для вибору головного спектрального каналу й найбільш ефективного методу злиття зображень, який полягає у двоступеневому визначенні показника успішності виконання завдання перед і після комплексування зображень та дозволяє автоматично забезпечити максимальну ймовірність виявлення, розпізнавання, ідентифікації об'єктів в ОЕСС з комплексуванням зображень.

6. Запропоновано новий метод формування поля змінної яскравості дифузними випромінювачами, в якому шляхом усунення впливу він'єтуючої діафрагми на ефективну площу відбиваючої поверхні оптично-спряжених інтегруючих сфер розширено функціональність за рахунок одночасного вимірювання зонної характеристики та функції передачі сигналу ОЕСС.

Практичне значення одержаних результатів:

Отримані в дисертаційній роботі результати є науковою основою для створення високоефективних багатоканальних ОЕСС. Практичне значення результатів

роботи полягає в наступному:

1. Розроблено технологію проектування багатоканальних ОЕСС, яка передбачає узгодження основних блоків інформаційних каналів між собою з врахуванням особливостей ФЦО та зорового сприйняття кінцевого зображення людиною-оператором.

2. Запропоновано методи габаритного та енергетичного розрахунку й узгодження параметрів вхідних оптичних блоків багатоспектральних ОЕСС на основі більш точних моделей перетворень сигналів в інформаційній системі, які дозволяють визначити основні характеристики об'єктів й приймачів випромінювання для отримання заданої ефективності спостереження.

3. Розроблено метод апостеріорного оцінювання якості злиття зображень в ОЕСС з ТВ та ТПВ каналами на базі показника успішності виконання завдання, який забезпечує найбільше значення ймовірності виявлення, розпізнавання й ідентифікації об'єкта в поточних умовах спостереження.

4. Запропоновано конструктивні рішення та розрахункові формули щодо комплексування візирного та прицільного каналів стрілецьких коліматорних та телескопічних прицілів в моноблочному виконанні, що значно підвищує надійність приладів і забезпечує граничну паралактичну похибку (0,7 – 4,8) мрад при використанні сферичних поверхонь.

5. Запропоновані засоби вимірювання енергетичних характеристик спектральних каналів ОЕСС (на які отримано патент на винахід №78609, МПК G01J1/10) забезпечують збільшений до 2,5 разів діапазон зміни поля яскравості та дозволяють створити вітчизняні вимірювальні лабораторії у цій високотехнологічній галузі.

6. Розроблено спосіб комплексування в двоканальних іконічних системах (отримано патент на корисну модель №82581, МПК G06T 5/50), що дозволяє збільшити ймовірність виявлення об'єктів до 12%.

Подані в дисертації результати відображені в публікаціях автора в повному обсязі, впроваджені і використовуються при проектуванні, теоретичному та експериментальному визначенні основних характеристик сучасних ОЕСС різного

призначення. Результати роботи знайшли практичне використання та впровадження в розробках ОЕСС різного призначення в КП СПБ «Арсенал», НДІ «Квант», ЦНДІ озброєння та військової техніки збройних сил України. Також результати досліджень викладаються в рамках лекцій та лабораторних робіт навчальних курсів «Космічні та авіаційні оптико-електронні прилади», «Проектування інфрачервоних сенсорів» при підготовці фахівців за спеціальностями 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Особистий внесок автора. Дисертаційна робота є узагальненням результатів майже тридцятирічних досліджень автора. Всі результати дисертації, які виносяться на захист, отримані автором особисто. В опублікованих у співавторстві наукових працях внесок автора є наступним: [1] – розроблено математичну модель двоканальної ОЕСС у складі ТВ та ТПВ каналів та досліджено ефективність використання послідовного комплексування інформації в одному каналі та паралельного комплексування в спектральних каналах за різних умов спостереження; [2, 17] - проведено аналіз сучасного стану багатоканальних ОЕСС з комплексуванням інформації, виділено першочергові проблеми галузі та визначено можливі напрями їх вирішення; [3] – досліджено переваги й недоліки схемотехнічних рішень одержання авіакосмічних гіперспектральних зображень; [4, 11, 13, 52] – проаналізовано типові оптичні схеми стрілецьких прицілів, обґрунтовано перевагу моноблочної конструкції та запропоновано принциповий підхід до розрахунку і конструктивного втілення малогабаритних прицілів; [5] – обґрунтовано перелік часткових показників якості, які визначають ефективність малогабаритних моноблочних прицілів і дозволяють знайти компроміс між діаметром вихідної зіниці та масою моноблока; [6, 8] – обґрунтовано умови мінімізації паралактичної помилки в лінзових та дзеркальних моноблоках коліматорних прицілів; [7] – теоретично й експериментально обґрунтовано метод отримання поля змінної яскравості в вимірювальному стенді; [9] – розроблено

метод синтезу та запропоновано варіанти конструкції моноблочного телескопічного прицілу на базі телескопічної лінзи; [10] – запропоновано модель для визначення вихідних даних при розрахунках оптичних прицілів з комплексуванням зображень; [12] – запропоновано та формалізовано модель зорової системи оператора в задачах прицілювання; [14, 28, 47, 49, 50, 53, 54] – запропоновано варіанти конструктивних рішень лабораторних стендів та обґрунтовано вибір елементної бази для вимірювання функції передачі сигналу, спектральної та зонних характеристик ОЕСС; [16, 36] – запропоновано спрощену модель розрахунку оптичного випромінювання в видимому та ІЧ діапазонах для аналізу та синтезу ОЕСС з комплексуванням інформації; [18, 26, 45, 46, 64] – визначено схемотехнічні тенденції в побудові перспективних ОЕСС космічного призначення та обґрунтовано шляхи конструктивного вдосконалення бортових ОЕСС; [20, 21, 23] – виконано розрахункові та експериментальні дослідження точності суміщення оптичних блоків ТВ і ТПВ каналів з матричними приймачами випромінювання; [22] – проведено теоретичне моделювання та експериментальне дослідження дистанційних спостережень в тумані та в умовах задимленості; [24] – виконано оцінку потенційної точності прицілювання в малогабаритних прицілах з голографічними оптичними елементами; [27, 58, 60] – обґрунтовано використання ТПВ каналу як допоміжного для діагностики порушень кровопостачання тканин біологічних об'єктів та розроблено лабораторний макет каналу; [29] – запропоновано спосіб модернізації авіаційного прицілу за рахунок комплексування інформаційних каналів; [30, 38, 65, 75] – розроблено стратегію комплексування інформації в двоканальних ОЕСС з використанням карти інформативності; [31, 77] – запропоновано метод узгодження діаметрів вхідних зіниць ТВ і ТПВ каналів на основі показника успішності виконання задачі; [32] – досліджено значимість ознак зображень при виявленні та розпізнаванні малорозмірних об'єктів; [33, 68] – запропоновано метод оцінки ефективності функціонування багатоканальних ОЕСС з комплексуванням інформації на основі показника успішності виконання задачі; [34, 70] – обґрунтовано показник об'єктивної оцінки якості зображень в бортових багатоканальних ОЕСС; [35, 43] – досліджено відмінність між реальною

пропускною здатністю ТПВ каналу з урахуванням зорового сприйняття і ефективною шумовою смугою стандартного еталонного фільтру; [37] – виконано математичне моделювання ТПВ каналу для синтезу оптичної системи за критерієм максимальної відстані розпізнавання; [39] - сформульовано задачу й вихідні дані попереднього фільтрування зображень в ОЕСС з комплексуванням; [40, 59] – виконано розрахунки освітленості на приймачі випромінювання при дистанційних спостереженнях з космосу; [41, 42] – проаналізовано вплив оптичного когерентного процесора на спектр зображень при їх обробці в ОЕСС з матричними приймачами випромінювання; [44] – проведено дослідження зміни модуляційної передавальної функції ОЕСС космічного базування в залежності від кута візування; [48, 67] – запропоновано формувати карту інформативності на основі показника успішності виконання завдання; [57, 62] – запропоновано для підвищення просторового розділення ОЕСС використання методу неконтрольованого мікросканування для відновлення зображень, спотворених вібраціями, та досліджено методи підвищення точності реєстрації зображень перед їх комплексуванням.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, окремі наукові результати роботи доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях, симпозіумах, зокрема: Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (м.Київ, 2002 - 2019 pp.), XXVII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми електроніки» (м.Київ, 2007 p.), Першій Всеукраїнській конференції «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (Київ, 2008 p.), 11-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2010 (Kyiv, 2010), 10 Міжнародній науково-практичній конференції «Динаміката на сьвременната наука» (м.Софія, 2014 p.), III Українській науково-технічній конференції «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи» (м.Київ, 2018 p.), науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» (м.Київ, 2017, 2018 pp.), Twelfth International

Conference on Correlation Optics (Chernivtzi, 2015), 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (Kyiv, 2019).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 79 наукових праць, у тому числі 2 монографії, 40 статей у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у виданнях іноземних держав, 29 статей у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 1 патент на винахід, 1 патент на корисну модель, 35 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний об'єм дисертації складає 388 сторінок, з об'ємом основного тексту 315 сторінок. Дисертація містить 85 рисунків, 27 таблиць, список використаних джерел з 272 найменувань на 30 сторінках і два додатки на 20 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Завдяки значному прогресу в створенні нової елементної бази і зниженню вартості до складу сучасних оптико-електронних систем спостереження (ОЕСС) входять, як правило, декілька різних оптико-електронних інформаційних каналів. Якщо спочатку різні канали працювали по черзі для забезпечення цілодобового всепогодного функціонування ОЕСС, то в даний час у зв'язку з підвищенням вимог до ефективності їх функціонування помітно актуалізувалася задача комплексування інформації з різних каналів при їх одночасній роботі. Створення ОЕСС з комплексуванням зображень є наразі одним з головних напрямів підвищення ефективності функціонування всепогодних цілодобових засобів спостереження навколишнього середовища. Також ще немає відповіді на багато питань, пов'язаних з узгодженням характеристик як інформаційних каналів, так і окремих блоків між собою [1]. Важливим є врахування того, що кінцевою ланкою аналізу інформації та прийняття рішення є людина-оператор. Термін «ефективність» в даній роботі вважається залежним від типу ОЕСС та поточної задачі, яка виконується. Найбільш вживаними для оцінки ефективності функціонування ОЕСС узагальненими характеристиками є дальності виявлення/розпізнавання при заданій ймовірності, точність наведення візирної осі, мінімальні виявлювані температурні контрасти тощо.

Даний розділ присвячено аналізу сучасного стану багатоканальних ОЕСС з комплексуванням інформації і проблемам, пов'язаним з цією галуззю. Розглянуто основні інформаційні канали ОЕСС, комплексування в оптико-електронних каналах, в оптико-електронних й оптичних каналах, в оптико-електронних та неоптичних каналах. За результатами розділу обґрунтовані найбільш доцільні шляхи підвищення ефективності функціонування ОЕСС, конкретизовано задачі досліджень.

1.1 Місце ОЕСС в загальному інформаційному середовищі «фоноцільова обстановка - ОЕСС - оператор»

Величезне різноманіття вирішуваних з допомогою ОЕСС прикладних і наукових завдань складно оцінити в повній мірі. До основних галузей, в яких ці системи використовуються широко, відносяться [12]:

- 1) Дистанційне зондування Землі з космосу та з повітря;
- 2) Спостереження в військових цілях;
- 3) Спостереження для охорони територій;
- 4) Дистанційна діагностика стану будівель, енергетичного обладнання тощо;
- 5) Медична функціональна діагностика і контроль;
- 6) Екологічний моніторинг та діагностика пожеж.

Перший з перерахованих напрямків є найбільш розгалуженим. Велика кількість задач, що вирішуються в рамках дистанційного зондування Землі з космосу та з повітря, безперервне розширення складу і покращення інформаційних характеристик бортових ОЕСС при одночасному їх вдосконаленні і здешевленні, розвиток нових технологій інтерпретації авіакосмічних даних, дають всі підстави прогнозувати, що в найближчі роки космічні та авіаційні ОЕСС стануть найбільш пріоритетним і ефективним класом бортового корисного навантаження. Серед найпоширеніших задач, які виконуються авіаційними і космічними ОЕСС такі [12]:

- прогнозування клімату, дослідження кліматичних змін (вимірювання альбедо Землі, вмісту малих газових компонентів атмосфери, атмосферного аерозолі, варіацій сонячного випромінювання тощо);
- прогнозування погоди (високоперіодичне отримання в глобальному масштабі даних про хмарний і сніжно-льодовий покриви, тривимірних полів температури і розподілу вологості атмосфери, тривимірних полів вітрів, розподілу температури і інших фізико-хімічних параметрів поверхні Землі);
- оцінка і прогноз стану сільськогосподарських культур, пасовищ, лісів, ґрунтів, внутрішніх водоймищ і сніжного покриву;

- інформаційне забезпечення господарської діяльності в провідних галузях економіки, пов'язаних з використанням і переробкою поновлюваних і неповнолюваних природних ресурсів, включаючи сільське, рибне, лісове, водне господарство, геологію і розробку родовищ корисних копалин;
- стереофотограмметрія, складання топографічних карт, цифрових карт геоінформаційних систем, карт сейсмічності і геологічних ризиків, карт лісових масивів, сільгоспугідь, інших карт тематичного призначення;
- інформаційне забезпечення діяльності по землеустрою, прокладці транспортних магістралей, будівництву промислових об'єктів і містобудуванню, складанню кадастрів земляних і інших природних ресурсів;
- океанографія і океанологія (зондування водних поверхонь з метою визначення їх температури, солоності, кольоровості, прозорості, біопродуктивності, забруднень, течій, льодової обстановки, приводного вітру, а також вивчення шельфу);
- стеження за льодовим покривом в полярних областях для забезпечення судноплавства;
- контроль і прогноз розвитку циклонів, ураганів, цунамі, забезпечення безпеки господарської діяльності в тайфунонебезпечних районах;
- екологічний моніторинг на глобальному, регіональному і локальному рівнях за розповсюдженням забруднень у всіх трьох основних природних сферах (атмосфера, поверхня суші, водне середовище), розвитком ерозійних та інших процесів деградації природного середовища; виявлення фактів і локалізація великих промислових і інших джерел забруднення навколишнього середовища; контроль трансграничного перенесення забруднень; екологічний моніторинг районів видобутку корисних копалин, транспортування вуглеводневого палива та небезпечних хімічних продуктів, найбільших скупчень промислових підприємств і мегаполісів;
- моніторинг надзвичайних ситуацій, включаючи виявлення факту надзвичайних ситуацій, оцінку масштабів і характеру руйнувань; прогнозування землетрусів і інших руйнівних природних явищ; сповіщення про цунамі, повені,

селі, хімічне і інше зараження місцевості, лісові пожежі, великі розливах нафтопродуктів тощо [12].

Спостереження в військових цілях, спостереження для охорони територій відрізняються масштабами інформаційних потоків, типами носіїв, специфічними технічними вимогами до ОЕСС тощо. Але споріднює їх однотипність глобальних виконуваних задач, а саме: пошук та виявлення об'єкту на фоні; розпізнавання об'єкту. Простір предметів має невизначені і випадкові просторові та часові характеристики, а отже - формує випадкове поле спектральної енергетичної світності оптичного діапазону спектру або випадкові просторові розподіли інших фізичних полів. З певною вірогідністю в ньому може знаходитися випромінюючий чи відбиваючий об'єкт, що становить певний інтерес в контексті вирішуваної пошукової задачі [2]. ОЕСС повинна допомогти відповісти на питання, чи є в полі зору сигнал разом з завадою або тільки завада. Тобто задача виявлення об'єкту є еквівалентною задачі виявлення корисного сигналу на фоні завад. Розпізнавання об'єкту можна охарактеризувати кількома ступенями, які в цілому визначають можливість достовірного віднесення об'єкту до відомого вузького класу [3].

Дистанційна діагностика стану будівель, енергетичного обладнання хоч і відрізняються суттєво один від одного за зовнішніми ознаками і місцем застосування, мають дуже схоже внутрішнє наповнення. Основні задачі, що вирішуються тут є тотожними до перелічених у попередньому абзаці: пошук та виявлення, розпізнавання об'єкту. Основними відмінностями є значно вужчі класи потенційних об'єктів і часто наявність апріорної інформації про можливе їх місцезнаходження (спрощена задача пошуку) [13].

Такі ж методи можна застосовувати до зондування біологічних об'єктів для одержання повної картини фізичних полів, які генеруються цими об'єктами. Розподіл таких полів у просторі й зміна в часі несуть важливу біологічну інформацію, яку можна використовувати з метою медичної діагностики. Вимірюючи відносно слабкі випромінювання біологічних об'єктів у широкому діапазонах різних фізичних полів, можна робити висновки про температуру, діелектричну проникність не тільки на поверхні, але й усередині живого організму.

Інформація з різних каналів взаємно доповнюється й дозволяє різнобічно охарактеризувати біологічний об'єкт у рамках відносно нескладних розрахункових моделей, що обумовлено невеликим алфавітом потенційних об'єктів [12].

Сучасні основи комплексування були сформульовані понад четверть століття назад [4]. З того часу запропоновано багато методів комплексування, що використовують різні моделі нейронних мереж, самонавчальних систем, теорію нечітких множин і т.п. [5, 6, 7]. Всі ці роботи схожі в тому, що розглядається в основному математичний аспект проблеми - питання впливу технічних характеристик конкретних блоків ОЕСС на комплексування винесені за рамки розгляду. Не ставлячи під сумнів цінність запропонованих алгоритмічних рішень, доцільно було б з'ясувати ступінь впливу тих або інших складових на процес комплексування, що дасть можливість підвищити точність алгоритмів. Крім того, враховуючи, що споживачем інформації у будь-якому ОЕСС керованого рухомого об'єкту є оператор, можна припустити можливість розробки достатньо уніфікованих стратегій комплексування для типових груп складових задач комплексування [2].

Алгоритми комплексування істотно залежать від того, чи знаходиться набір чутників на одній або на декількох платформах. Для ОЕСС оптичного діапазону характерне розміщення чутників у вигляді оптико-електронних каналів на єдиній платформі, а центр ухвалення рішень може знаходитися як на цій же платформі, так і зовні неї. Другий варіант використовується в дистанційно керованих рухомих об'єктах і його розгляд виходить за рамки даної роботи. В першому варіанті набір чутників і центр ухвалення рішень функціонують в однакових зовнішніх умовах і виконують єдину задачу. Звичайно виділяють три основні стратегії комплексування, які визначаються тим, чи працює центр ухвалення рішень з необробленими сигналами від чутників (комплексування на рівні чутників), або частина функцій центр ухвалення рішень передається чутникам і на його вхід подається заздалегідь оброблена інформація (комплексування на рівні узагальнених параметрів) або в центр ухвалення рішень з кожного каналу подається повністю оброблена інформація і остаточне рішення приймається

виходячи з аналізу часткових рішень (комплексуювання на рівні рішень). У будь-якому випадку функціональні блоки ОЕСС з точки зору комплексуювання утворюють єдине середовище, що аналізує вхідне поле під впливом зовнішніх умов. Вхідним полем при цьому є фоно-цільова обстановка [2, 12].

Узагальнена структура середовища комплексуювання (рис. 1.1) визначається формою подання інформації чутниками в центр ухвалення ішень і його типом.

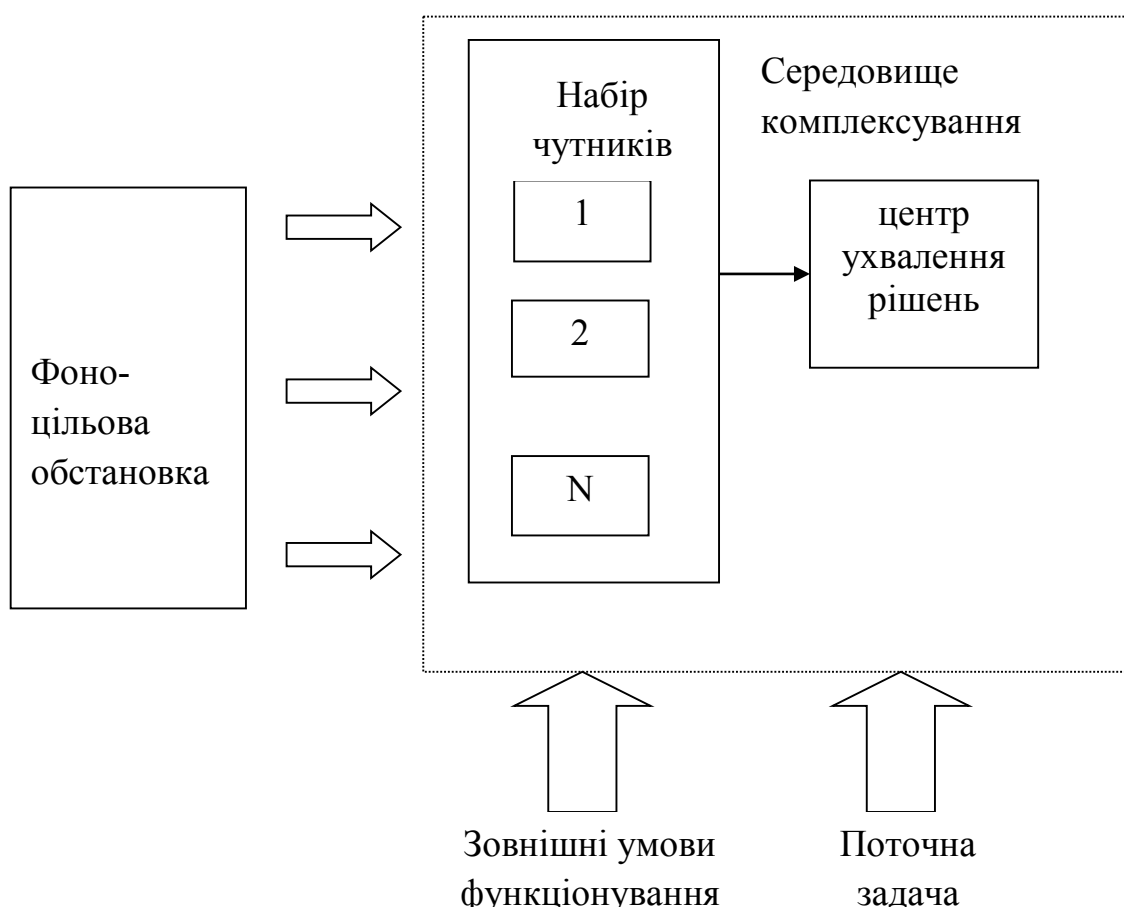


Рис. 1.1. Структурна схема середовища комплексуювання

Перша ознака визначається вказаними вище стратегіями комплексуювання. За другою ознакою можна виділити середовища комплексуювання з автоматичним центром ухвалення рішень, напівавтоматичні і неавтоматизовані з людиною-оператором в ролі центру ухвалення рішень. Останній випадок на сьогодні найбільш поширений і використовується для забезпечення згаданого вище всепогодного функціонування ОЕСС. Такий режим роботи максимально завантажує оператора, практично виключає одночасне використання різних

чутників і є неперспективним. На найближчий час найперспективнішими будуть напіваавтоматичні середовища комплексування, а пізніше – автоматичні [2].

Середовище комплексування функціонує під впливом зовнішніх умов і вирішуваної задачі. Очевидно, що правила функціонування середовища повинні задаватися центром ухвалення рішень виходячи з його особливостей. Тоді пріоритетним чинником, що визначає алгоритми функціонування середовища, є поточна задача.

Переважає більшість ОЕСС призначена для пошуку та виявлення, розпізнавання об'єкту, наведення та супроводу. Ці задачі задають релевантні ознаки вхідного поля і логіку роботи центру ухвалення рішень, які практично не залежать від типу чутників.

Зовнішні умови є дестабілізуючими чинниками і формують реакцію середовища, направлену на відновлення робочих режимів в прийнятних діапазонах. Слід розділити зовнішні умови по місцю їх впливу: умови функціонування чутників і умови функціонування центру ухвалення рішень. Відповідно, в першому випадку зовнішні умови впливають безпосередньо на сигнали чутників, а в другому - через режим роботи центру ухвалення рішень - на алгоритми комплексування. У будь-якому випадку конкретні параметри зовнішніх умов нескладно звести до поправочних коефіцієнтів, граничних умов і т.п., які описують роботу чутників і центру ухвалення рішень [2].

Другим значущим чинником життєдіяльності середовища є фоно-цільова обстановка (ФЦО) [2]. Причому, в автоматичних середовищах, правила ухвалення рішень яких не визначаються жорстко особливостями візуального сприйняття людини і можуть необмежено модифікуватися, ФЦО як формотворчий чинник має більше значення, ніж в напіваавтоматичних і неавтоматизованих середовищах. В контексті рішення задачі комплексування інформації ФЦО є просторово-часовим розподілом електромагнітного поля на входах чутників, який сформований в результаті взаємодії фізичних об'єктів в полі зору із зовнішніми полями і середовищем розповсюдження випромінювання. Для переважної більшості реальних ситуацій можна виділити три типи фонів [8]: однорідні, квазіоднорідні,

неоднорідні, які, в свою чергу розділяються на десятки класів і підкласів. Щодо визначення типових об'єктів спостереження – тут ситуація ускладнюється значною кількістю можливих галузей застосування ОЕСС. З метою отримання зіставних результатів для різних типів ОЕСС можливо обмежити алфавіт об'єктів і фонів найпростішим випадком - прямокутний рівноконтрастний об'єкт на рівнояскравому фоні [9]. Вплив середовища розповсюдження випромінювання на ФЦО має загалом досить складний характер, але за нечисленними виключеннями (наприклад – астрономічні ОЕСС наземного базування) його подібно до зовнішніх умов можна врахувати в параметрах об'єктів і фонів [2].

Чутники, не визначаючи в цілому ідеологію роботи середовища комплексування, впливають на неї через формати подання інформації. Для ОЕСС характерними видами інформації, що поступає з чутників, є електричний сигнал або оптичний сигнал, формати подання інформації в яких визначаються конкретними типами чутників. В ОЕСС, як правило, використовуються три формати вихідного сигналу - двовимірний оптичний, тривимірний оптичний, електричний. Специфікації форматів (часові, енергетичні, фазові або просторові) важливі при комплексуванні на рівні чутників або узагальнених параметрів. У разі комплексування на рівні рішень конкретні характеристики форматів значення не мають [2].

Аналіз призначення, технічних і експлуатаційних характеристик ОЕСС керованих рухомих об'єктів показує, що кількість стратегій комплексування інформації визначається виходячи з кількості задач комплексування, форматів даних чутників, типів ФЦО і з урахуванням рівня комплексування.

В найпростішому випадку типового об'єкту на рівномірному фоні при комплексуванні на рівні ухвалення рішень кількість стратегій дорівнює кількості задач; при комплексуванні на рівні чутників - може досягати дев'яти [2].

1.2 Основні типи ОЕСС з комплексуванням зображень

Комплексування інформації використовується дуже широко у всіх галузях знань - від економіки і соціології - до медицини і технічних наук. Суть цього процесу полягає в ухваленні якого-небудь рішення про стан досліджуваного об'єкту на основі даних, отриманих з різних джерел; мета - підвищення ефективності ухваленого рішення. Комплексування здійснюється між джерелами інформації і центром ухвалення рішень. У разі реалізації всієї інформаційної системи у вигляді окремих фізичних пристроїв, при комплексуванні необхідно брати до уваги досліджуваний об'єкт, набір інформаційних чутників і центр ухвалення рішень [10].

Донедавна інформаційні канали ОЕСС будувались тільки на основі оптико-електронних або оптичних систем. Це було обумовлено переважно двома причинами: - низькою просторовою роздільною здатністю інших типів чутників; - відносно низькими вимогами до інформативності вихідного зображення і поганою розвиненістю технічних та програмних засобів обробки вхідних сигналів. Зараз ситуація докорінно змінилась. На тлі дедалі жорсткіших вимог до якості прийняття рішень оператором ОЕСС з'явилися нові типи чутників з великою роздільною здатністю (наприклад, радіолокатори з синтезованою апертурою і просторовим розділенням 1 м з низьких космічних орбіт); створені ефективні математичні апарати, що дозволяють аналізувати величезні обсяги інформації і формувати на виході візуальні зображення; сучасні комп'ютери здатні виконувати майже в реальному масштабі часу розроблені математичні алгоритми. Крім того, інтенсивні роботи в галузі обчислювальної техніки, кібернетики, штучного інтелекту тощо привели розробників до розуміння, що зображення в полі зору оператора зовсім не обов'язково має бути максимально схожим на доступний йому в повсякденні оптичний образ простору предметів. Основною вимогою наразі стала максимальна ефективність функціонування системи «ОЕСС - оператор» в заданих умовах. Виходячи з цього окремим інформаційним каналом ОЕСС може бути будь-який пристрій, який може впливати на якість вихідного візуального зображення [11, 12].

Аналіз окремих інформаційних каналів ОЕСС доцільно здійснювати за ознакою фізичного поля, вимірювання якого відображає стан простору об'єктів. В таблиці 1.1 наведені типи фізичних полів формування вхідних сигналів, які можуть входити до складу багатоканальних ОЕСС [12].

Таблиця 1.1

Можливі типи чутників ОЕСС

№	Тип чутника	Формат вихідного сигналу
1	2	3
<i>Електромагнітне поле оптичного діапазону</i>		
1.	Монокулярні візуальні канали	Двовимірний оптичний
2.	Бінокулярні візуальні канали	Дво/тривимірний оптичний
3.	Електронно-оптичні перетворювачі	Двовимірний оптичний
4.	Пасивні телевізійні системи видимого діапазону спектру	Електричний / двовимірний оптичний
5.	Телевізійні системи видимого діапазону спектру з постійним підсвічуванням	Електричний / двовимірний оптичний
6.	Телевізійні системи видимого діапазону спектру з імпульсним підсвічуванням	Електричний / двовимірний / тривимірний оптичний
7.	Пасивні телевізійні системи ультрафіолетового діапазону спектру	Електричний / двовимірний оптичний
8.	Низькорівневі телевізійні системи	Електричний / двовимірний оптичний
9.	Пасивні тепловізійні системи	Електричний / двовимірний оптичний
10.	Активні тепловізійні системи з постійним підсвічуванням	Електричний / двовимірний оптичний
11.	Активні тепловізійні системи з імпульсним підсвічуванням	Електричний / двовимірний / тривимірний оптичний
12.	Лазерні скануючі далекомірні системи	Електричний / двовимірний / тривимірний оптичний
13.	Відеоспектрометри	Електричний / двовимірний багатодіапазонний оптичний
14.	Відеополяриметри	Електричний / двовимірний оптичний
15.	Гамма-квантові діагностичні системи	Електричний / двовимірний / тривимірний оптичний
16.	Рентгенівські діагностичні системи	Електричний / двовимірний / тривимірний оптичний
<i>Електромагнітне поле радіо діапазону</i>		
17.	Радіолокаційні системи з синтезованою апертурою	Електричний / двовимірний оптичний

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
18.	Пасивні мікрохвильові багатоканальні радіометри	Електричний / двовимірний оптичний
<i>Акустичне поле</i>		
19.	Ультразвукові локатори	Електричний / двовимірний / тривимірний оптичний
20.	Пасивні акустичні чутники	Електричний
<i>Радіаційне поле</i>		
21.	Пасивні координатні радіаційні чутники	Електричний / двовимірний оптичний
22.	Радіаційні томографи (нейтронні, позитронні тощо)	Електричний / двовимірний / тривимірний оптичний
<i>Магнітне поле</i>		
23.	Магніто-резонансні томографи	Електричний / двовимірний / тривимірний оптичний

Хоч, як видно з таблиці, основним видом інформаційного сигналу є електромагнітне поле, не виключено, що в майбутньому з'являться нові типи чутників, які можна буде використовувати в складі ОЕСС. Наприклад, гравіметри є поки що інтегральними чутниками, але можливо з часом їх просторова роздільна здатність стане достатньою для створення зображень [12].

Інформативність зображення в ОЕСС залежить від кількості робочих спектральних діапазонів або фізичних полів, в рамках яких збираються дані про простір об'єктів. Дуже важливим є питання про кількість інформаційних каналів, необхідну для надійного розпізнавання зображення оператором. З теорії розпізнавання образів відомо, що при зростанні числа спектральних каналів, точність розпізнавання зростає лише до певного моменту, а потім, при подальшому збільшенні цього числа, вона падає [13]. Це пояснюється тим, що при збільшенні числа інформаційних каналів необхідна оцінка множини статистик все більш високої розмірності по обмеженому фіксованому числу вибірок. При цьому помітно ускладнюється система обробки даних в реальній системі, наприклад, значно збільшується машинний час, необхідний для проведення складних обчислень. Таким чином, існує оптимальна кількість спектральних ознак. Наприклад, при дистанційному зондуванні природних ресурсів було встановлено,

що максимум вірогідності розпізнавання по спектральних ознаках досягається при трьох релевантних ознаках. Ймовірність розпізнавання при використанні більшого числа ознак істотно менше [13].

В таблиці 1.2 наведені приклади інформаційних каналів деяких ОЕСС для забезпечення різних задач дистанційних спостережень [14 - 17].

Таблиця 1.2

Типи чутників для вирішення деяких задач дистанційного моніторингу [13]

Задача дистанційного моніторингу	Типи чутників / інформаційних каналів
Метеорологічні спостереження: температурний профіль атмосфери	Пасивні мікрохвильові чутники, тіньові радіо GPS-чутники, тепловізійні системи високого просторового розділення
Метеорологічні спостереження: атмосферний профіль вологості	Пасивні мікрохвильові чутники, пасивні тепловізійні системи ультрафіолетового та видимого діапазонів, тепловізійні системи середнього інфрачервоного діапазону
Моніторинг озонного шару	Пасивні тепловізійні системи ультрафіолетового та видимого діапазонів, тепловізійні системи, мікрохвильові чутники
Моніторинг аерозолів, визначення метеорологічної дальності бачення	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького та середнього інфрачервоного діапазонів
Визначення вмісту парникових газів (CO_2 , CH_4) в атмосфері	Тепловізійні системи
Визначення розподілу вітрів	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи, доплерівські лазерні вимірювачі швидкості
Визначення рівня океану, стану його поверхні	Лазерні висотоміри, скатерометри
Визначення температури суші та океану	Тепловізійні системи, мікрохвильові чутники
Визначення забарвлення океану, концентрації хлорофілу	Відеоспектрометри
Моніторинг снігових покривів	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького та середнього інфрачервоного діапазонів середнього розділення, пасивні мікрохвильові чутники

Продовження таблиці 1.2

Моніторинг та картографування озер	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького інфрачервоного діапазону, радіолокатори з синтезованою апертурою, висотоміри
Моніторинг льодовиків і льодового покриву	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького та середнього інфрачервоних діапазонів високого розділення, висотоміри
Визначення альbedo земних поверхонь	Панхроматичні та багатоканальні телевізійні системи видимого діапазону, відеоспектрометри
Моніторинг вологості ґрунту (до 100 мм глибини)	Активні та пасивні мікрохвильові чутники
Глобальний моніторинг земної біомаси	L / P полосні радіолокатори з синтезованою апертурою, лазерні висотоміри
Оглядові системи військового призначення	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи близького, середнього та довгохвильового інфрачервоних діапазонів, низькорівневі телевізійні системи
Прицільно-оглядові системи військового призначення	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи, лазерний цілевказівник
Медична діагностика пухлин, маммографія	Телевізійні системи видимого діапазону, довгохвильові тепловізійні системи
Спостереження навколишнього простору самохідними роботизованими пристроями	Лазерні скануючі далекомірні системи, телевізійні системи видимого діапазону
Картографування	Панхроматичні та багатоканальні телевізійні системи видимого діапазону, радіолокатори з синтезованою апертурою, координатні чутники (інерціальні, GPS)
Стереофотограмметрія	Панхроматичні та багатоканальні телевізійні системи видимого діапазону, лазерні далекоміри
Огляд транспортних засобів службами безпеки	Телевізійні системи видимого діапазону, тепловізійні системи, лазерні скануючі далекомірні системи, чутники гамма-хвиль та нейтронів

Вихідним сигналом майже всіх ОЕСС, що наведені в табл. 1.2, є двомірне зображення на одному моніторі. Це зображення аналізується оператором шляхом виявлення в ньому релевантних (важливих для заданої задачі) ознак з метою

діагностування стану окремих об'єктів чи всього простору об'єктів. Найголовнішою задачею процесу комплексування є об'єднання різних інформаційних потоків для одержання нової інформації про досліджуваний об'єкт, яка не є доступною в кожному окремому каналі. В цьому сенсі роботу окремих каналів можна уявити як перенос інформації від об'єкта до оператора, а функція самої ОЕСС полягає в формуванні оптимальної конфігурації інформаційного каналу. Для цього необхідно мати ефективний механізм комплексування каналів. Такий механізм є інтерфейсом між простором об'єктів, окремими інформаційними каналами ОЕСС, змістом поточного завдання і зовнішніх умов його виконання, оператором [10]. Тому крім дослідження кожної з наведених складових інформаційного процесу, актуальними напрямками в галузі іконічних систем дистанційного зондування є саме створення механізмів комплексування каналів [12].

1.2.1 ОЕСС з оптико-електронними каналами

Інформаційні канали в ОЕСС, як сказано вище, можуть відрізнятись за різними ознаками, але на практиці основною ознакою є спектральний діапазон роботи каналу. ОЕСС такого типу застосовуються головним чином в космічній та військовій галузях. В таблиці 1.3 наведені основні характеристики типових ОЕСС з комплексованими оптико-електронними каналами для дистанційного зондування Землі з космосу [18 - 24].

Розділення каналів ОЕСС по спектру здійснюється двома принципово різними групами методів. В методах першої групи зображення простору предметів поступають на приймач випромінювання (ПВ) вже обмеженими вузьким піддіапазоном спектру. Так зроблено в багатоканальних ОЕСС, характеристики деяких з яких наведено вище. В методах другої групи випромінювання кожної точки зображення перед реєстрацією ПВ розкладається в спектр. Ці методи лежать в основі роботи відеоспектрометрів.

Найбільш вживані схеми оптичного суміщення в ОЕСС представлені на рис. 1.2: схеми а) і б) працюють за поділом по амплітуді, а схеми в) і г) – за поділом по фронту потоку випромінювання. Слід зазначити, що в ОЕСС з кількістю каналів більше 2 і з матричними ПВ (МПВ) для суміщення оптичних осей використовуються частіше амплітудні схеми з призовими світлоподільниками [25].

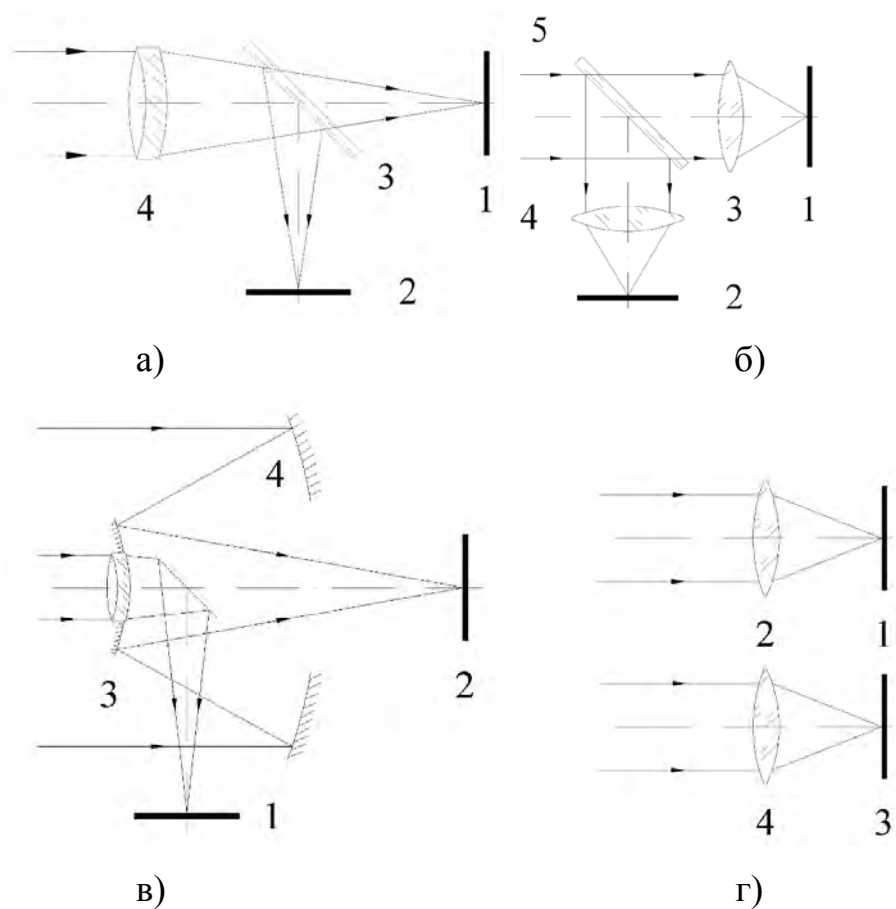


Рис. 1.2. Типові схеми входних блоків двоканальних ОЕСС [25]:

а) 1, 2 - площини ПВ каналів; 3 - дихроїчне дзеркало; 4 - широкоспектральний об'єктив; б) 1, 2 - площини ПВ каналів; 3, 4 - вузькоспектральні об'єктиви каналів; 5 - дихроїчне дзеркало; в) 1, 2 - площини ПВ каналів; 3, 4 - з'ясований двоспектральний об'єктив; г) 1, 3 - площини ПВ каналів; 2, 4 - вузькоспектральні об'єктиви каналів

Розповсюдженими рішенням вхідних блоків ОЕСС, що працюють у видимому, ближньому і дальньому інфрачервоному (ІЧ) діапазонах, є використання світлоподільників. Причому використовуються як різні об'єктиви і каналів (рис.1.2 , б), так і об'єктив з єдиним вхідним компонентом і наступними спектроподільними оптичними елементами (рис. 1.2, а).

В коаксіальній схемі двоканальної ОЕСС (рис. 1.2, в) кожен із каналів має власний об'єктив та МПВ, які розташовані на спільній оптичній осі. Об'єктив одного із каналів (зазвичай ІЧ каналу) має центральне він'єтування. Перевагами даної схеми є відсутність паралаксу, характерного для схеми з повністю автономними спектральними каналами, та відсутність втрат просторового розділення в короткохвильовому діапазоні, що характерно для схеми з багатодіапазонним МПВ [25].

Найпростішою схемою побудови ОЕСС (рис. 1.2, г) є механічне об'єднання двох або більше автономних інформаційних каналів. Перевагою такої схеми є можливість досягнення максимальних показників якості у кожному каналі. До недоліків слід віднести наявність паралаксу, в результаті чого зображення, отримані в кожному каналі, є зміщеними одне відносно одного, а також великі габарити. Знехтувати паралаксом можна в тих випадках, коли відстань між паралельними один одному оптичними осями об'єктивів різних каналів ОЕСС є значно меншою за відстань до об'єкта спостереження. Об'єднання зображень в таких системах забезпечуються апаратно-програмними засобами.

Для послідовного розділення спектральних каналів також можна використовувати оптичні фільтри, розташовані, наприклад, в поворотній оправі [26]. Недоліком такої схеми є наявність рухомих деталей. При використанні даної схеми можливі труднощі з обробкою та інтерпретацією отриманої спектральної інформації внаслідок часових і просторових зміщень зображень, що відбуваються при переході від одного спектрального піддіапазону до іншого.

Зауважимо, що МПВ з багатодіапазонними (кольорочутливими) пікселями, які наразі є найбільш розповсюдженими засобами отримання кольорового зображення в побутовій апаратурі, не розглядаються як ОЕСС з комплексуванням в контексті

вирішуваних в даній роботі задач внаслідок їх функціонування тільки в видимому діапазоні спектру. Практичній реалізації ОЕСС з такими МПВ перешкоджають: відсутність або надмірна складність і дороговизна багатодіапазонних 3- і 4-кольорових МПВ з необхідними спектральними характеристиками, особливо для діапазонів, що лежать за межами 12 мкм; необхідність охолодження (навіть глибокого) ряду МПВ (наприклад приймачів на базі Si:As - до 10 K); складність створення простої та недорогої оптичної системи, що якісно працює у всіх спектральних діапазонах.

Відеоспектрометричні ОЕСС використовують для дистанційного зондування Землі з космосу [27]. Їх вхідні блоки можна розділити на два класи за способом вилучення спектральної інформації з випромінювання: дисперсійні і інтерферометричні. У ОЕСС дисперсійного типу для розкладання світла в спектр можуть використовуватися призми або дифракційні ґратки. ОЕСС інтерференційного типу засновані на двопроменевих інтерферометрах (Майкельсона, Маха - Цендера, Саньяка) і часто називаються Фур'є - спектрометрами [28].

Залежно від характеру сканування поверхні Землі ОЕСС дисперсійного типу можна розділити на дві групи - з двовимірним скануванням (механічним, Whisk-Broom) і з одновимірним скануванням (електронним, Push-Broom). В системах першого типу використовуються лінійки ПВ, а другого типу - матричні ПВ.

При використанні методу Whisk-Broom (ОЕСС типу NIMS, VIMS, AVIRIS, SCIAMACHY, MODIS-N, GERIS тощо) миттєве поле зору визначається одним елементом лінійки ПВ і одночасно реєструється спектр тільки одного пікселя розкладу. Лінійка ПВ розташовується в площині зображення своєї довгою стороною вздовж напрямку дисперсії (рис. 1.3). Скануюче дзеркало забезпечує перегляд поверхні уперек шляху носія (по координаті x), а сканування по координаті y (уздовж шляху) здійснюється за допомогою руху самого носія. Після закінчення формування рядка дзеркало повертається у вихідну позицію. Зворотний хід найчастіше використовується для спектрального і радіометричного калібрування приладу.

Метод Push-Broom (OECC типу AIS, SISEX, HIRIS, MERIS, MODIS-T, ROSIS, CASI, TIIS тощо) дає можливість проводити одночасну реєстрацію спектрів всього рядка пікселів (рис. 1.4). Миттєве поле зору в цьому випадку охоплює відразу всю смугу огляду і визначається рядком або стовпцем матриці ПВ. Сканування по координаті y , так само, як і в попередньому випадку, здійснюється за допомогою руху самого носія. Вхідне дзеркало використовується для перенацілювання і дає можливість оглядати дуже великі площі. Перевагою Push-Broom BC над Whisk-Broom BC є збільшення часу інтегрування рядка і відповідне поліпшення відношення сигнал/шум.

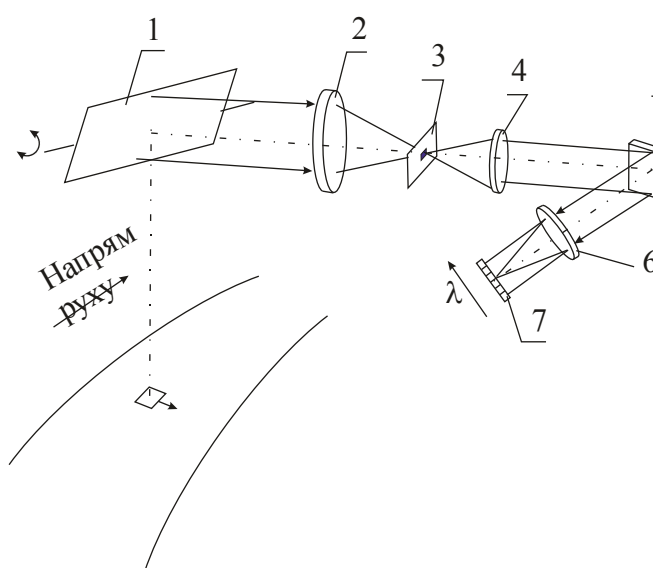


Рис. 1.3. Метод сканування Whisk-Broom

1 - скануюче дзеркало; 2 - вхідний об'єктив; 3 - польова діафрагма; 4 - коліматор; 5 - диспергуючий елемент; 6 - об'єктив; 7 - лінійка ПВ

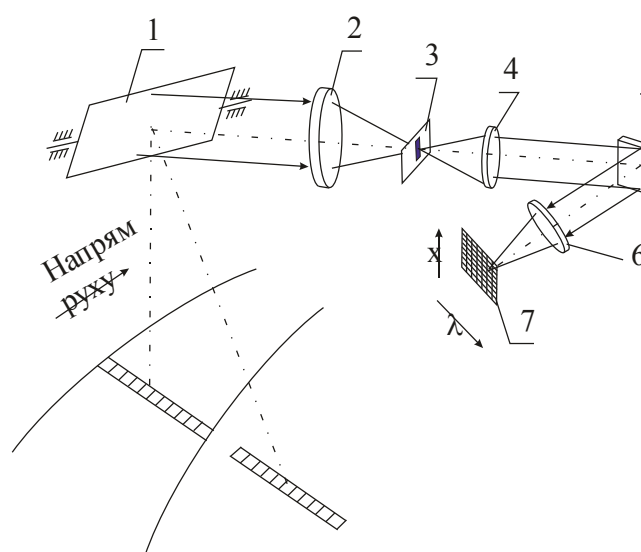


Рис. 1.4. Метод сканування Push-Broom

1 - дзеркало перенацілювання; 2 - вхідний об'єктив; 3 - польова діафрагма; 4 - коліматор; 5 - диспергуючий елемент; 6 - об'єктив; 7 - матриця ПВ

Як видно з рис. 1.3 і рис.1.4, узагальнена схема інформаційного каналу відеоспектрометра включає вхідну оптику, польову діафрагму, поліхроматор, камерний об'єктив і блок ПВ. Вхідна оптика містить дзеркало 1 сканування/перенацілювання і об'єктив 2, призначений для формування

зображення поверхні Землі в площині установки діафрагми 3. У зворотному ході променів об'єктів 2 проектує діафрагму 3 на поверхню Землі. Його фокусна відстань визначає лінійне миттєве поле зору, в той час як діаметр вхідної зіниці впливає на величину енергії, що надходить в систему [29]. Діафрагма 3 є вхідною апертурою поліхроматора. Її форма диктується методом сканування: для Whisk-Broom вона має форму пікселя ПВ, а для методу Push-Broom діафрагма має форму рядка ПВ. Діафрагма 3 може бути пропускаючою або дзеркальною. Другий тип дозволяє помітно спростити оптичну систему за рахунок введення кривизни поверхні дзеркала, проте використовується рідше через складну технологію виготовлення та негативний вплив дефектів і забруднення відбиваючої поверхні на якість сигналу. Поліхроматор складається з коліматора і диспергуючого елемента, який розкладає вхідний інтегральний потік випромінювання на спектральні потоки по кутах в залежності від довжини хвилі. Для отримання суцільного спектра застосовуються призми (явище дисперсії) або дифракційні решітки (явище дифракції та інтерференції).

1.2.2 ОЕСС з оптичними та оптико-електронними каналами

Типовими ОЕСС, в яких комплексуються оптичний та оптико-електронний канали, є прицільні системи. Багато діагностичних, вимірювальних, прицільних та реєструючих приладів вимагають попереднього наведення на об'єкт спостереження. Це можуть бути, наприклад, радіометри або інші пристрої дистанційного вимірювання параметрів об'єктів, теодоліти, фото-, кіно- та відеотехніка, далекоміри. У таких випадках зазвичай зображення об'єкта поєднується із зображенням прицільної марки і часто немає необхідності в значному збільшенні масштабу зображення об'єкта. Основною вимогою є простота і надійність пристрою наведення, забезпечення необхідної точності.

Через оптичний канал ОЕСС оператор спостерігає ФЦО, а через оптико-електронний канал в поле зору вводяться прицільна мітка, службова інформація тощо. Тобто комплексування передбачає зведення в поле зору оператора візирного

та прицільного каналів. Оптико-електронний канал зазвичай будується за коліматорною схемою, а оптичний – за коліматорною, або за телескопічною. Схеми з телескопічними системами можуть використовуватись як функціонально закінчені прицільні прилади для стрілецького й артилерійського озброєння, або як візуальні канали у складі ОЕСС (наприклад, танкових). Колімаційні схеми не передбачають оптичного збільшення і використовуються, наприклад, в індикаторних системах для накладання службової інформації на зображення ФЦО в полі зору оператора в авіації, автомобілях, формування прицільної марки.

1.2.2.1 Комплексування в коліматорних схемах

Комплексування в індикаторних системах з колімаційним виведенням зображення є досить відпрацьованим на практиці питанням і потребує доопрацювання в конкретних випадках застосування. Більш проблемним є формування прицільної марки для стрілецького озброєння. В цьому випадку необхідно забезпечити точність, надійність, малогабаритність.

В [30] докладно проаналізовані основні схеми коліматорних прицілів (КП) – лінзові, дзеркальні, меніскові, голографічні. Наразі при створенні КП для стрілецької зброї багато провідних фірм-виробників («Ring Sight Ltd.», Великобританія, «Falcon», США тощо) роблять ставку на прості дзеркальні меніскові схеми. Їх перевага перед лінзовими в тому, що спектроподільник на меніску одночасно виконує функції колімації зображення прицільної сітки та суміщення його з простором об'єктів, тим самим спрощуючи конструкцію прицілу. Однак специфіка компоновання дзеркальної схеми передбачає зміщення геометричній осі дзеркального об'єктива щодо сітки – децентрування. Це призводить до збільшення похибки кутового положення лінії прицілювання, обумовленої сферичною аберацією. Також показано, що моноблочне виконання ОЕСС вирішує цілий ряд проблем, властивих класичній схемі прицілу, зокрема, - виключає запотівання внутрішніх оптичних поверхонь при різкій зміні

температури і можливе різностування прицілу при тривалих і короточасних динамічних впливах.

1.2.2.2 Комплексування в телескопічних схемах

При комплексуванні зображень в телескопічних системах об'єктивом формується проміжне зображення ФЦО, а за допомогою окуляра це зображення розглядається оператором з певним збільшенням. В площину проміжного зображення виводиться також додаткова службова інформація. Наприклад, в телескопічному прицілі (ТП) це є прицільне перехрестя або сітка. Таким чином, очі спостерігача акомодують тільки на одну відстань, оскільки зображення цілі і сітка лежать в одній площині. При використанні ТП підвищується точність наведення в порівнянні з механічним візиром і прицілом коліматора, можливе пряме наведення (в межах поля зору прицілу) на великих дальностях в умовах слабкої освітленості. Перераховані переваги ТП є настільки важливими, що цим типом прицілу користуються навіть тоді, коли необхідна точність прицілювання могла б бути забезпечена і іншими типами прицілів. Основний недолік ТП - обмежене поле зору. Внаслідок цього ускладнюється наведення по рухомій цілі. Саме через цей недолік в зенітних прицілах малокаліберної артилерії застосовують коліматорні приціли.

Аналіз існуючих ТП показує, що, як правило, вони будуються за класичною схемою Кеплера [31 - 34]. Зорова труба Галілея не застосовується, оскільки в ній важко сформувавши прицільне перехрестя. Принципова відмінність схем полягає лише в типі обертаючої системи і в конструкції сітки. За типом обертаючої системи ТП підрозділяються на лінзові, волоконно-оптичні і призматичні [35, 36.].

В [37] наведено результати порівняльного аналізу принципів оптичних схем ТП. Важливими додатковими порівняно з КП характеристиками ТП є віддалення вихідної зіниці і видиме збільшення. Відповідно створення моноблочної конструкції ТП з задовільними характеристиками значно ускладнюється порівняно з КП.

В [38] показано, що для стрілецької зброї лінзовий моноблочний КП перевершує інші типи прицілів за багатьма показниками, поступаючи лише по точності. Слід зазначити, що точність в задачах прицілювання забезпечується якістю реєстрації при комплексуванні зображень в двох каналах. Застосування асферичних оптичних елементів або колірне кодування зони допустимого паралакса забезпечують достатню якість, але збільшують вартість виробу, а колірне кодування впливає на ергономічні показники. Тому визначення умов, коли паралактична помилка в лінзових моноблоках є мінімальною, і шляхів її зменшення стає важливою науковою задачею при комплексуванні інформації в візуальних каналах ОЕСС.

1.2.3 ОЕСС з оптико-електронними та неоптичними каналами

Такі ОЕСС дедалі ширше використовуються в різних галузях. Наприклад, однією із областей сучасної медицини, яка найбільше активно сьогодні розвивається, є функціональна діагностика, що пов'язана з контролем стану регуляторних систем гомеостазу, в котрих раніше за все повинні проявлятися зміни які приводять у подальшому до патології.

При серцево-судинних захворюваннях основна небезпека полягає у розвитку ускладнень, а саме змін на рівні мікросудин, які обумовлюють розвиток порушень. Актуальною є розробка методів швидкісного, неінвазивного синхронного аналізу парціального тиску кисню (PO_2) у видихуваному повітрі та на поверхні уражених ділянок тіла людини після визначення таких ділянок за допомогою контролю теплових полів поверхні тіла з метою подальшої функціональної діагностики локальних порушень кровоплину на рівні капілярів. Точне визначення ураженого місця і характеру судин є важливою біомедичною задачею. Вирішення її із використанням лише сенсору кисню буде вимагати дуже багато часу – пошук пошкоджених тканин треба проводити поступово, а кожне вимірювання проводиться на протязі певного часу.

В основу аналізу парціального тиску кисню покладено безкровний черезшкірний (транскутанний) метод визначення PO_2 крові в гіпертермічних ділянках шкіри з використанням ОЕСС [39]. Запропонований комплексний метод контролю фізико-хімічного стану мікросудин людини, заснований на контролі теплових полів на ділянках шкіряного покриву з подальшим визначенням границь ушкоджень мікросудин за допомогою вимірювання вмісту кисню в міжклітинній рідині транскутанним датчиком. Незважаючи на те, що тепловізійні методи діагностики використовуються для розпізнавання багатьох захворювань, розпізнати ступень ураження судин та мікросудин людини тільки за допомогою цих методів неможливо [40].

Відомо про існування постійного зв'язку певних ділянок шкіри із внутрішніми органами у тому числі із судинами та мікросудинами. Зміни у мікросудинах призводять до зміни функціональних характеристик пов'язаних з ними ділянок шкіри. Однією з таких змін є температурна реакція шкірного покриву. Друга зміна - це парціальний тиск кисню в крові, вимірювання якого надає можливість судити саме про зміни на рівні капілярів і вен.

Важливим фактором, який визначає достовірність отриманих результатів, є адекватність інтерпретації ТПВ зображення. Теоретичні дослідження та експериментальні вимірювання показали, що навіть в умовах клінічного стаціонару ТПВ зображення, що сформоване досить чутливою ОЕСС, по-перше, має значні похибки відносно реального температурного розподілення на поверхні шкіри внаслідок впливу зовнішнього середовища; по-друге, може бути неточно інтерпретоване пересічним оператором. Для компенсації похибок зовнішніх впливів автори запропонували використовувати ОЕСС з двома ІЧ каналами - пасивним середнього спектрального піддіапазону і активно/пасивним - ближнього. Подальше комплексування сигналу дозволяє значно покращити адекватність вихідного зображення. Покращення візуальної інформативності здійснюється на основі аналізу релевантних ознак зображень, які є досить універсальними безвідносно до типу оптико-електронної системи [2].

1.3 Комплексування інформації при візуальних спостереженнях

Загальновідома модель комплексування інформації [41], що була запропонована американською спілкою директорів лабораторій (JDL), є ієрархічною та багаторівневою (рис. 1.5).

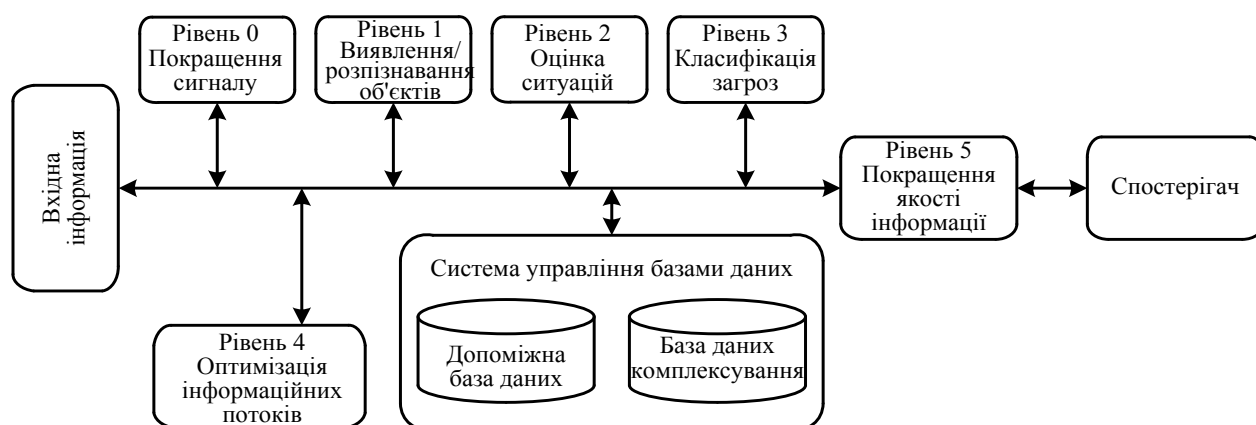


Рис. 1.5. Модель комплексування інформації JDL

Вхідна інформація може надходити з різних локальних або розподілених датчиків, фізично зв'язаних з системою комплексування, з інших джерел знань.

Нульовий рівень (розподілення процесів) обробки сигналу забезпечує підвищення ефективності комплексування шляхом розподілу сигналів по відповідним блокам обробки виходячи з конкретної поточної задачі. Наприклад, ознаки розташування об'єкта направляються на перший рівень виявлення, а ознаки загроз - на другий рівень. На цьому етапі можуть бути задіяні методи виявлення сигналів [13].

Перший рівень - виділення релевантних ознак - призначений для виявлення з потоку даних характеристик конкретних об'єктів в полі зору. На цьому етапі вирішуються чотири основні задачі: визначення положення всіх об'єктів в полі зору, визначення параметрів руху об'єктів, розподілення інформації між об'єктами, класифікація об'єктів [13].

На другому рівні (оцінка ситуації) встановлюються взаємні зв'язки між об'єктами і явищам в полі зору. Виявляється характер взаємодії встановлених на першому рівні параметрів окремих об'єктів в контексті ФЦО. При обробці додатково враховується вся доступна інформація про ФЦО і умови роботи (стан атмосфери, час, характер території тощо). Методи обробки на цьому рівні базуються на моделях візуального сприйняття та інтерпретації інформації спостерігачем [13].

Третій рівень (оцінка загроз) є прогностичним. На цьому етапі оцінюється подальший розвиток поточної ситуації. Тут враховуються апріорні знання і гіпотези про поведінку об'єктів, застосовуються різні методи теорії ігор.

Четвертий рівень (покращення процесу) оптимізує всі інші процеси комплексування. Він обіймає чотири ключові задачі - оцінку поточної і прогнозування майбутньої ефективності комплексування, виявлення інформації, яка є необхідною для покращення процесу комплексування, визначення джерела найбільш релевантної на даному етапі інформації, перерозподіл інформаційних потоків для найкращого виконання задачі. В той час як джерела інформації четвертого рівня і відповідні інформаційні процеси можуть бути відокремленими від аналізованої системи, цей рівень тільки частково належить до локального середовища комплексування [13].

П'ятий рівень (покращення процесу пізнання) передбачає підвищення якості сприйняття інформації оператором. Причому крім покращення візуального сприйняття (тривимірні монітори, автоматичне розпізнавання жестів та відслідковування напрямку зору, сенсорні монітори) на цьому рівні застосовуються всі можливі впливи - звукові, тактильні тощо. Інтерфейс «комп'ютер - оператор» має бути максимально «дружнім» і сприятливим для діяльності оператора [13].

В ході візуальних спостережень ОЕСС, що сама є системою, входить до складу більш узагальненої системи [42]. Метою візуальних спостережень є оцінка стану ФЦО на різних рівнях. Для цього інформація від об'єктів в просторі предметів збирається ОЕСС і відображається в полі зору оператора, який приймає рішення про стан цих об'єктів. Інформація переноситься сигналами у різній формі.

В цьому сенсі сигнал є фізичним процесом, який переносить інформацію від об'єкта спостереження до суб'єкта прийняття рішення про стан об'єкта. ОЕСС, по суті, є інтерфейсом між об'єктом і суб'єктом спостереження. Рішення, яке формується спостерігачем, є суб'єктивною комплексною оцінкою зображення в полі зору в контексті поточної задачі і умов спостереження. При цьому спостерігач порівнює візуальний образ на сітківці ока (це останній елемент загального інформаційного середовища, в якому сигнал має форму двовимірного оптичного поля) з образом, що є сформованим на психічному рівні, з врахуванням додаткової інформації, яка поступає до спостерігача.

Очевидно, що якість процесу прийняття рішення за нормальних умов в першу чергу залежатиме від змісту і форми подачі візуальної інформації в полі зору оператора ОЕСС. Найбільш важливою задачею є відображення релевантних (тобто – значимих) ознак стану ФЦО. Значимість ознак визначається, як мінімум, фізичним станом ФЦО, типом поточної задачі спостереження, психофізіологічними особливостями та умовами зорової діяльності оператора [13].

Релевантні ознаки зображень є об'єктом досліджень в психології, психофізіології, психофізиці, системах штучного інтелекту, кібернетиці, системах технічного зору, робототехніці тощо. Багато ознак є спільними як для суб'єктивних, так і для об'єктивних оцінок зображень. Більш того, враховуючи надзвичайну ефективність візуального сприйняття, розробники намагаються максимально використати його особливості і для неіконічних систем аналізу зображень. Тому говорячи про релевантні ознаки зображень, в подальшому розглядатимемо ті з них, які є визначальними в процесі сприйняття візуальної інформації людиною-оператором. Важливими процесами, які задають рівень релевантності, крім зорового сприйняття є фізична модель перетворення інформації про стан об'єкта у оптичне зображення, а також задача зорової діяльності. Встановивши релевантність ознак зображень можна оптимізувати технічні вимоги до ОЕСС [13].

Аналіз релевантних ознак слід розділити за місцем їх виникнення – при формуванні ФЦО, при перетворенні оптичного сигналу в електричний в приймачі

випромінювання, при перетворенні електричного сигналу в оптичний в засобі відображення, при зоровому сприйнятті. Звичайно, важливі ознаки можуть бути сформовані в електронному тракці ОЕСС. Але в загальному випадку вони не є первинними, тобто такими, що не залежать від розробника ОЕСС - формування таких ознак спрямоване на оптимальне конфігурування інформаційного каналу, тобто є одним з основних засобів комплексування [13].

Перетворення оптичного сигналу в електричний супроводжується модифікаціями характеру інформаційного потоку. Найсуттєвішу роль в цьому процесі відіграє просторова дискретизація аналогового оптичного сигналу: переважна більшість ТВ і ТПВ каналів ОЕСС використовують дискретні ПВ, а в приймачах відиконного типу відбувається електронне сканування. В аналогових низькорівневих ОЕСС з окулярним виводом зображення перетворення оптичного сигналу в електричний відсутнє.

Зворотне перетворення електричного сигналу в оптичний, враховуючи значний прогрес в засобах відображення інформації, практично не викликає безпосередньо виникнення додаткових релевантних ознак в зображенні. В той же час, характеристики оптичного поля, яке спостерігає оператор, дуже сильно впливають на результат спостереження. Це ж можна сказати і про зорове сприйняття. Нормальна зорова система не створює в зображенні релевантних ознак, але умови спостереження і властивості оператора суттєво впливають на результати його роботи. Тобто, з точки зору формування релевантних ознак зображення, систему «засіб відображення інформації - оператор» слід розглядати як єдиний елемент, що виконує функції аналізу релевантності в контексті поточної задачі [13].

1.3.1 Послідовне комплексування інформації в ОЕСС

В одноканальних ОЕСС комплексування інформації відбувається послідовно у часі. Результатом комплексування як правило є:

- розширення динамічного діапазону;

- збільшення глибини різко зображуваного простору;
- підвищення просторового розділення та компенсація впливу вібрацій;
- створення стеріоскопічного зображення.

Перше та друге з перерахованих застосувань комплексування використовується зазвичай в статичних методах спостереження, наприклад, у фотографії. Четверте застосування є характерним для авіакосмічних спостережень. Для ОЕСС, що розглядаються в даній роботі актуальним є комплексування для компенсації вібрацій. При цьому також можна дещо підвищити просторову роздільну здатність.

Експериментально доведено [43], що найбільші спотворення зображення викликає рух платформи та вібрації. На практиці вібрації можна мінімізувати, але повністю усунути - неможливо. Тому важливою проблемою є отримання зображень високого розділення в умовах вібрацій.

На даний момент вищезгадану проблему долають шляхом вирішення двох окремих задач:

- відновлення зображень, спотворених вібраціями [43];
- підвищення просторової роздільної здатності зображень за рахунок методів суперрозділення [44].

Для вирішення цих задач використовують спеціальні методи [43, 45 – 48]. Але вони мають певні недоліки, а саме: необхідність наявності апіорної інформації про умови зйомки, ускладнення конструкції за рахунок використання додаткових механічних елементів, необхідність великої кількості ітерацій при обрахунках та інші.

У відомих методах контрольованого та неконтрольованого мікросканування [49 - 51] використовується комплексування субпіксельно зміщених зображень. В контрольованому мікроскануванні траєкторія і величина субпіксельного зміщення є відомими і не потребують окремих засобів визначення. При неконтрольованому мікроскануванні, яке є інтересом досліджуваної галузі, обов'язковим етапом є реєстрація зображень з визначенням координат їх зміщення. На практиці використовують кілька підходів для вирішення даної задачі [52]:

кореляційний, градієнтний, частотний, фазовий. В випадку використання градієнтних алгоритмів вважається, що всі часові зміни розподілу інтенсивності в кадрі викликані лише рухом носія. Але тут існують певні обмеження. Двовірні похідні зазвичай визначаються за допомогою багаторазового використання високочастотних і низькочастотних фільтрів. Цей метод передбачає двохступеневу реалізацію:

- визначення просторово-часових похідних інтенсивності зображення в кадрі (що є еквівалентним визначенню швидкостей перпендикулярних до локальних структур інтенсивності);

- об'єднання перпендикулярних швидкостей в повні швидкості.

Основою даного методу є рівняння обмеження руху. Будемо вважати, що $I(x, y, t)$ - інтенсивність центрального пікселя в області розміром $n \times n$, який зміщується на величини $\delta x, \delta y$ протягом часу δt . Оскільки $I(x, y, t)$ і $I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t)$ є зображеннями однієї і тієї самої точки (тобто є однаковими), маємо

$$I(x, y, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t). \quad (1.1)$$

Дане припущення лежить в основі двовірного рівняння обмеження руху [50]. Вираз (1.1) є справедливим для невеликих значень $\delta x, \delta y, \delta t$. Його можна записати у вигляді ряду Тейлора першого порядку:

$$I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \delta t + \delta_{en}, \quad (1.2)$$

де $v_x = \frac{\delta x}{\delta t}$ і $v_y = \frac{\delta y}{\delta t}$; x та y - компоненти руху зображення; $\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y}, \frac{\partial I}{\partial t}$ - похідні інтенсивності зображення в (x, y, t) ; δ_{en} - члени розкладу вищих порядків, значення яких є малими і їх можна не враховувати.

Запишемо похідні в останньому виразі як

$$I_x = \frac{\partial I}{\partial x}, \quad I_y = \frac{\partial I}{\partial y}, \quad I_t = \frac{\partial I}{\partial t}. \quad (1.3)$$

Тоді

$$(I_x, I_y) \cdot (v_x, v_y) = -I_t, \quad (1.4)$$

або

$$\nabla I \cdot \vec{v} = -I_t, \quad (1.5)$$

де $\nabla I = (I_x, I_y)$ – просторовий градієнт інтенсивності; $\vec{v} = (v_x, v_y)$ – швидкість зображення.

Останній вираз є рівнянням обмеження руху, що є наслідком апертурних ефектів - зазвичай недостатньо локальної частини інтенсивності зображення для визначення повної швидкості зображення, але достатньо для визначення компонента, перпендикулярного до локальної структури. Тангенціальна компонента швидкості \vec{v}_t не може бути визначена. Величина і напрям швидкості $\vec{v}_n = v_n \hat{n}$ можуть бути розраховані виключно в термінах похідних інтенсивності I_x, I_y, I_t як

$$v_n = \frac{-I_t}{\|\nabla I\|_2} \quad \text{і} \quad \hat{n} = \frac{(I_x, I_y)}{\|\nabla I\|_2}, \quad (1.6)$$

де v_n і \hat{n} – грубе значення величини швидкості та грубе значення напрямку відповідно, тобто:

$$\vec{v}_n = v_n \hat{n} = \frac{-I_t (I_x, I_y)}{\|\nabla I\|_2^2}, \quad (1.7)$$

де $\nabla I = (I_x, I_y)$ – просторовий градієнт швидкості.

Градієнтні методи можуть бути непрактичними у випадку наявності шуму, перенакладення просторових спектрів та при недостатній кількості кадрів. В такому випадку використовують кореляційні методи. При цьому вимірюється відстань [53]

$$d_{g,t}^2(u,v) = \sum_{x,y} [g(x,y) - t(x-u, y-v)]^2, \quad (1.8)$$

де $g(x,y)$ – зображення; $t(x,y)$ – елемент зображення з центром в (u,v) .

З (1.8) маємо

$$d_{g,t}^2(u,v) = \sum_{x,y} [g^2(x,y) - 2g(x,y)t(x-u, y-v) + t^2(x-u, y-v)]. \quad (1.9)$$

Доданок $\sum t^2(x-u, y-v)$ є константою. Якщо доданок $\sum g^2(x,y)$ також наближено є константою, то елемент взаємної кореляції має вигляд

$$c(u,v) = \sum_{x,y} g(x,y)t(x-u, y-v). \quad (1.10)$$

Даний метод має ряд недоліків:

- діапазон $c(u,v)$ залежить від розміру шаблону;
- якщо енергія зображення $\sum g^2(x,y)$ змінюється з позицією, то використання (1.10) не має сенсу. Наприклад, кореляція між частиною зображення та її точною копією в зображенні може мати менше значення, ніж кореляція між частиною зображення та будь-якою яскравою прямою;
- вираз (1.10) не є інваріантним до змін амплітуди зображення, наприклад, таких, що спричиняються змінами освітлення.

Коефіцієнти кореляції долають ці обмеження шляхом нормалізації, в результаті чого отримуємо кореляційні коефіцієнти в наступному вигляді:

$$\gamma(u,v) = \frac{\sum_{x,y} [g(x,y) - \bar{g}_{u,v}] [t(x-u, y-v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [g(x,y) - \bar{g}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0,5}}, \quad (1.11)$$

де \bar{t} - середнє значення шаблону; $\bar{g}_{u,v}$ - середнє значення $g(x,y)$ в області шаблону.

Інший метод знаходження зміщення зображень методом кореляції полягає в наступному. Нехай $g_{m,n}$ і $\bar{g}_{m,n}$ - інтенсивність та середнє значення інтенсивності зображення g розміром $M \times N$ в позиції (m,n) . Такі ж позначення маємо для

зображення q . Тоді нормалізована взаємна кореляція між локальними блоками зображень q і g може бути записана наступним чином:

$$c_{ij,d_x,d_y} = \frac{\text{cov}_{ij,d_x,d_y}(g,q)}{\sqrt{\text{var}_{ij}(g) \times \text{var}_{ij,d_x,d_y}(q)}}, \quad (1.12)$$

де

$$\text{cov}_{ij,d_x,d_y}(g,q) = \sum_{m=i-K}^{i+K} \sum_{n=j-L}^{j+L} (g_{m,n} - \bar{g}_{i,j}) (q_{m+d_x,n+d_y} - \bar{q}_{i+d_x,j+d_y}), \quad (1.13)$$

$$\text{var}_{ij}(g) = \sum_{m=i-K}^{i+K} \sum_{n=j-L}^{j+L} (g_{m,n} - \bar{g}_{i,j})^2, \quad (1.14)$$

$$\text{var}_{ij,d_x,d_y}(q) = \sum_{m=i-K}^{i+K} \sum_{n=j-L}^{j+L} (q_{m+d_x,n+d_y} - \bar{q}_{i+d_x,j+d_y})^2, \quad (1.15)$$

де i, j - індекси рядків і стовбців в зображенні; d_x, d_y - зміщення блоку в межах області пошуку в другому зображенні; K, L - визначають розмір вікна кореляції; \bar{q} і \bar{g} - середні значення в межах вікна пошуку.

Зазвичай для отримання коефіцієнтів кореляції фіксують точку в першому зображенні, а d_x та d_y змінюють в межах $[-w_x, +w_x]$ і $[-w_y, +w_y]$.

Частотний метод базується на використанні фільтрів швидкості [54]. Перевагою методу є те, що за рахунок використання механізмів, чутливих до руху, в області просторових частот можна оцінити рух для зображень, де попередні методи не працюють.

Перетворення Фур'є для рухомого зображення:

$$F\{\nu, \omega\} = F_0\{\nu\} \delta(\omega + \kappa^T \nu), \quad (1.16)$$

де $F_0\{\nu\}$ - перетворення Фур'є від $I_0(x, 0)$, $\delta(\nu)$ - дельта функція; ω - часова частота; $\nu = (\nu_x, \nu_y)$ - просторова частота.

З останньої формули можна отримати рівняння обмеження руху в частотній області $\kappa^T \nu + \omega = 0$, яке показує, що швидкість рухомого зображення є функцією

просторово-часової частоти і що вся ненульова енергія, яка пов'язана з рухом зображення, лежить в частотній області.

Фазовий підхід розглядає рух зображення як фазові зміни на виході просторово-часового фільтра. Фазовий аналіз вважається більш стійким, ніж його амплітудний аналог, але він також може стати нестійким у випадку виникнення фазових сингулярностей.

Недоліком неконтрольованого мікросканування є неможливість гарантії визначеного рівня підвищення роздільної здатності, оскільки субпіксельні зміщення зображень є стохастичними. Але в цілому позитивний ефект обумовлений як мінімум компенсацією вібрацій.

1.3.2 Комплексування інформації в багатоканальних ОЕСС

В залежності від того, які дані використовуються при сполученні зображень можна виділити наступні категорії комплексування [55]:

- комплексування зображень, отриманих від приймачів одного типу в один і той же час, але з різних точок зору (multiview fusion)

- комплексування зображень, отриманих від ПВ різних типів: ІЧ зображення з телевізійними, дані панхроматичної та спектральної зйомки і т.п. (multimodal fusion)

- комплексування зображень, отриманих в різний час з метою виявлення змін між ними або для синтезу зображень, в яких усунуті перешкоди, що заважають спостереженню об'єктів в певні періоди часу (multitemporal fusion)

- комплексування зображень, отриманих при різних фокусних відстанях об'єктиву (multifocus fusion)

- комплексування двох або більше зашумлених, спотворених зображень однієї і тієї ж картини з метою отримання комбінованого зображення покращеної якості – вільного від шуму та змазу (fusion for image restoration)

- комплексування спотворених зображень низького розділення з метою отримання комбінованого зображення високого розділення (super resolution fusion)

У випадку ОЕСС найбільш актуальним є комплексування зображень, отриманих від приймачів різних типів, зокрема ТВ та ТПВ зображень.

1.4 Програмні й апаратні методи об'єднання зображень

Алгоритми комплексування в багатоканальних ОЕСС є найбільш різноманітними. Перед безпосередньо процесом комплексування виконується реєстрація, тобто радіометрична і геометрична корекція сигналів в каналах. На цьому етапі в разі комплексування на рівні чутників необхідно витримати дуже високу точність – адже всі алгоритми цього рівня є дуже чутливими до геометричної неузгодженості. Також в залежності від вибраної стратегії комплексування на попередньому етапі можуть відфільтровуватись шуми (особливо – спекл-шуми в системах з активним каналом) [13].

Іноді, при великій різниці в роздільній здатності комплексованих зображень, передискретизація у більш високо роздільний формат може супроводжуватись виникненням блочної структури зображення. Для уникнення цього на попередньому етапі використовують згладжуючу фільтрацію [13].

Допустима кількість окремих інформаційних каналів відрізняється в різних алгоритмах комплексування, наприклад, відомий метод «інтенсивність – тон – насиченість» (Intensity – Hue - Saturation, IHS) є обмеженим за цим параметром. Тому в ряді випадків необхідно відібрати тільки ті канали, інформація в яких є потенційно найбільш цінною для поточної задачі. Значного розповсюдження набули статистичні алгоритми, за якими інформаційна місткість каналу визначається максимальною мінливістю даних в ньому, наприклад, з допомогою так званого оптимального характеристичного показника [56]. Іншими алгоритмами зменшення кількості інформаційних каналів є аналіз головних компонентів (PCA, Principal Component Analysis), статистичні алгоритми оцінки кореляції між зображеннями в каналах [57, 58].

Великий обсяг алгоритмів комплексування розробляється для кольорових зображень. В цілому ці алгоритми можна розділити на дві великі групи: ті, що використовують як аргумент функцій координати кольору; ті, що використовують

кольоровість. В першому випадку результуючий колір визначається за координатами на хроматичних діаграмах. Представлення другої групи використовують яскравість об'єкта, інтенсивність тону і насиченість. Часто для визначення кольору використовується декартова система координат RGB. Це зручно з огляду на те, що в цій системі визначаються кольори на моніторі [13].

Метод композитних кольорів (Red Green Blue, RGB) дозволяє відтворювати кольорове зображення як суміш трьох чистих кольорів – червоного, зеленого, блакитного [59]. Він дозволяє реалізовувати багато варіантів за рахунок співставлення шкали сірого з окремими кольорами з різними ваговими коефіцієнтами. Легко здійснюється виділення потенційно цікавих об'єктів кольором. Комплексування методом композитних кольорів успішно використовується при обробці космічних зображень з радарів з синтезованою апертурою, наприклад для супутника ERS-1 [59], а також для сумісної обробки таких зображень з інформацією оптичних каналів. Часто цей метод використовують разом з іншими (IHS, PCA тощо) позаяк він не може забезпечити чітку кореляцію інформації між спектральними каналами [13].

Метод IHS є одним з найпоширеніших для обробки і комплексування зображень високого просторового розділення з панхроматичного каналу і низького просторового розділення зі спектральних каналів [60, 61]. Цей метод використовується для покращення передачі кольорів, виділення релевантних ознак, підвищення просторового розділення. Алгоритм IHS побудовано з досвіду вивчення зорового сприйняття людини. Він ефективно розділяє просторову (інтенсивність) і спектральну (тон, насиченість) інформацію у стандартних RGB зображеннях і полягає в обрахуванні трьох величин [62]:

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}; \quad H = \tan^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right); \quad S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}. \quad (1.17)$$

В усіх модифікаціях алгоритмів IHS закладено механізм заміщення однієї з трьох компонентів сигналом з іншого інформаційного каналу. Найчастіше заміщується інтенсивність. На практиці використовуються пряме IHS-перетворення і метод з заміщенням кольорових координат. В першому випадку обробляються сигнали про інтенсивність, тон і насиченість, які поступають по окремим інформаційним каналам. В другому випадку кольори трансформуються з RGB-простору в IHS координати. Фізичною інтерпретацією IHS координат приблизно можна вважати шорсткість поверхні об'єкта для інтенсивності, максимальну спектральну смугу відбиття для тону і чистоту поверхні для насиченості. Потім одна з компонент заміщається деякою четвертою функцією (здебільшого – контрастом), яка є основою для подальшого відновлення зображення. Комплексування здійснюється шляхом зворотнього перетворення з IHS координат в RGB координати [62]:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I \\ \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}. \quad (1.18)$$

Таким шляхом (заміщенням розподілу інтенсивностей в спектральних каналах інтенсивністю з панхроматичного каналу високого просторового розділення з подальшим зворотнім перетворенням в RGB координати) формуються високороздільні кольорові зображення земної поверхні з космосу [13].

В різних модифікаціях описаного методу допускаються лінійні перетворення, масштабування однієї з компонент перед зворотнім перетворенням, до того ж це масштабування може бути різним для кожної з величин. Одним з близьких до IHS методом є трансформування в координати тону, насиченості, амплітуди (т.зв. метод HIS або HSV [63]).

Метод яскравості-кольоровості використовує перетворення сигналу з RGB координат в YIQ координати. В YIQ-просторі Y описує яскравість монохромного

зображення, яке комбінується з блакитного, зеленого і червоного сигналів пропорційно до спектральної чутливості зорової системи. Компоненти I і Q є кольорами, що введені для полегшення обробки сигналу в реальних системах: I – це різницевий сигнал «червоний мінус блакитний (cyan)», Q – «пурпурний (magenta) мінус зелений». Пряме перетворення з RGB координат в YIQ координати описується формулою (1.19) [64]:

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ 0,596 & -0,274 & -0,322 \\ 0,211 & -0,523 & 0,312 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}, \quad (1.19)$$

а зворотнє перетворення – формулою (1.20):

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,000 & 0,956 & 0,621 \\ 1,000 & -0,272 & -0,647 \\ 1,000 & -1,106 & -1,703 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix}. \quad (1.20)$$

Компоненти Y, I, Q є менш корельованими між собою, ніж R, G, B , тому даний метод є більш ефективним для покращення зображень.

Якщо позначити панхроматичне зображення високого розділення як $\ddot{G} = G(m, n)$, а $B_k = B_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$ – зображення, отримані в K спектральних діапазонах одночасно з $G(m, n)$, і вважати, що всі ці зображення після проведення координатної обробки геометрично сполучені. Одержання для $\ddot{G}(m, n)$ спектрозональних компонентів $G_k = G_k(m, n)$, $k = \overline{1, K}$, приблизно такого ж розділення включає два етапи.

На першому етапі по спектрозональним зображенням B_k , $k = \overline{1, K}$, виконується оцінка спектральної яскравості точок земної поверхні у вигляді полінома $G(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_r \lambda^r$. На другому етапі на основі зображень \ddot{G} , B_k , $k = \overline{1, K}$, і функції $G(\lambda)$ з використанням того або іншого алгоритму виконується формування G_k , $k = \overline{1, K}$.

Існують кілька варіантів рішення цієї задачі.

На основі B_k , $k = \overline{1, K}$ оцінимо спектральну яскравість спостережуваної сцени

$G(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_r \lambda^r$. Потім, використовуючи механізм модуляції сигналом \ddot{G} спектральнозональних компонентів, які визначаються $G(\lambda)$ і границями спектральних діапазонів λ'_k, λ''_k , $k = \overline{1, K}$, одержимо:

$$D_k = \ddot{G} \frac{\int_{\lambda'_k}^{\lambda''_k} G(\lambda) d\lambda}{\frac{1}{K} \int_{\lambda'_1}^{\lambda''_1} G(\lambda) d\lambda} = \ddot{G} \frac{\sum_{r=0}^{K-1} \left(a_r \frac{(\lambda'_k)^{r+1} - (\lambda''_k)^{r+1}}{r+1} \right)}{\frac{1}{K} \sum_{r=0}^{K-1} \left(a_r \frac{(\lambda''_1)^{r+1} - (\lambda'_1)^{r+1}}{r+1} \right)}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (1.21)$$

Вираз, що стоїть в знаменнику (1.21), впливає на розподіл енергетичної яскравості по діапазонах пропорційно співвідношенню спектральнозональних сигналів B_k , $k = \overline{1, K}$.

По зображеннях $\ddot{G}, B_2, B_3, \dots, B_K$ оцінимо $G_1(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_{1r} \lambda^r$, після чого по виразу (1.21) одержимо першу компоненту G_1 . По зображеннях $B_1, \ddot{G}, B_3, \dots, B_K$ оцінимо $G_2(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_{2r} \lambda^r$, після чого по виразу (1.21) одержимо G_2 . Далі за аналогією одержимо G_3, G_4, \dots, G_k . Тобто в даному підході для формування спектральнозональної компоненти G_k використовується функція $G_k(\lambda)$, отримана по зображеннях B_j , $j \neq k$, і зображенні G , яке виступає замість B_k .

Аналогічно другому підходу одержимо $G_k(\lambda)$, $k = \overline{1, K}$. Далі сформуємо шукані зображення G_k , $k = \overline{1, K}$, наступним чином:

$$G_k = \int_{\lambda'_k}^{\lambda''_k} G_k(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}. \quad (1.22)$$

Аналогічно другому й третьому підходам одержимо $G_k(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} a_{kr} \lambda^r$. Далі знайдемо середню характеристику $\overline{G}(\lambda) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K G_k(\lambda) = \sum_{r=0}^{K-1} \overline{a_r} \lambda^r$,

$$\text{де } \overline{a_r} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K a_{kr}.$$

Після цього одержимо

$$G_k = \int_{\lambda'_k}^{\lambda''_k} \overline{G}(\lambda) d\lambda, \quad k = \overline{1, K}. \quad (1.23)$$

Експериментально визначено, що при $K \geq 3$ найбільш якісні результати дає перший підхід, при $K = 2$ - другий підхід.

На рис. 1.6 представлені панхроматичний знімок (а)), спектрозональний знімок (б)), результат комплексування (в)) у вигляді спектрозонального зображення високого просторового розділення [64]. Очевидно, що рис. 1.6, в) по просторовому розділенню близький до панхроматичного знімку.

Серед арифметичних алгоритмів комплексування одними з найпростіших є різноманітні комбінації додавання та множення. Наприклад, один з таких алгоритмів ефективно працював з інформацією в космічних місіях Landsat-TM та SPOT [65]. Алгоритми комплексування сигналів двох каналів мали вигляд:

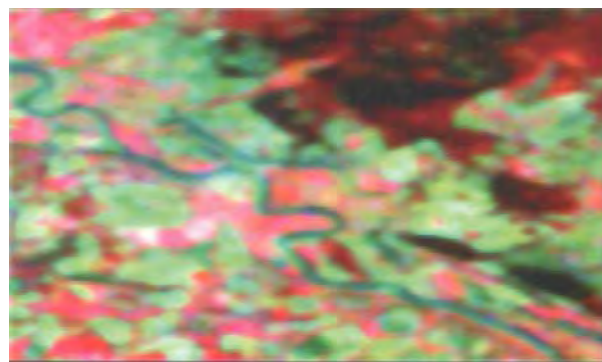
$$GN_f = A(w_1 GN_a + w_2 GN_b) + B, \quad (1.24)$$

$$GN_f = A GN_a GN_b + B, \quad (1.25)$$

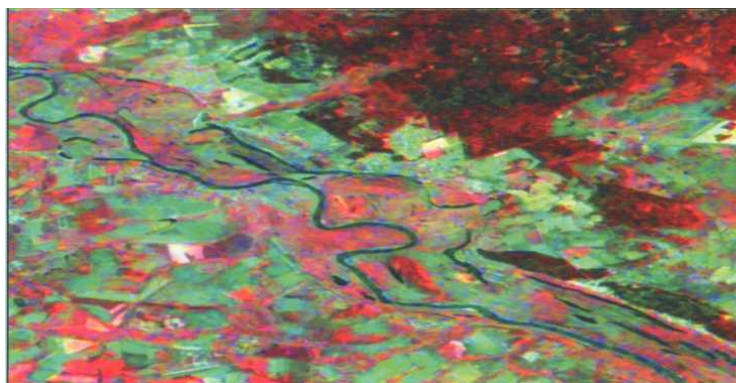
де A, B – масштабні коефіцієнти; w_1, w_2 – вагові коефіцієнти.



а) панхроматичний знімок



б) спектрозональний знімок



в) результат комплексування

Рис. 1.6. Комплексування спектрозональних зображень з даними панхроматичної зйомки

Успішний вибір коефіцієнтів в формулах (1.24), (1.25) забезпечує хороші результати комплексування [66, 67]. Ці методи широко застосовуються для комплексування панхроматичних і спектральних каналів космічних ОЕСС.

Принципово не відрізняються від розглянутих методи комплексування відніманням та діленням (досить замінити додатні коефіцієнти від'ємними) [13]. Часто на практиці такі методи є більш результативними, адже дозволяють реєструвати зміни в сигналах, які бувають дуже інформативними [68]. Враховуючи, що обчислена різниця може прийняти від'ємне значення, часто в різницевих алгоритмах вводять додатню підставку. У диференційних методах важливим є вибір верхнього і нижнього порогу різниці або відношення сигналів в пікселях комплексованих зображень: з одного боку важливо не допустити виникнення шумових викидів при наявності великих різниць вимірюваних величин, з другого

– не пропустити малої зміни вимірюваної величини. Для цього використовують нормалізацію сигналів в каналах, наприклад, за алгоритмом [69]:

$$\frac{XS_3 - XS_2}{XS_3 + XS_2} - \frac{TM_4 - TM_3}{TM_4 + TM_3} + C . \quad (1.26)$$

Для підвищення просторового розділення без помітних втрат радіометричного розділення використовується алгоритм [67]:

$$DN_{HybXS(j)} = DN_{PAN} \frac{DN_{XS(i)}}{DN_{SynPAN}} , \quad (1.27)$$

де $DN_{HybXS(j)}$ – результуючий піксел обробленого зображення; DN_{PAN} – поточний піксел панхроматичного каналу високого розділення; $DN_{XS(i)}$ – поточний піксел i -го спектрального каналу; DN_{SynPAN} – поточний піксел синтезованого панхроматичного каналу низького просторового розділення, який складається з усіх пікселів спектральних каналів.

Схожі принципи закладені в алгоритм Брові (Brovey Transform), який використовується в RGB моніторах для нормалізації при покращенні якості зображень [63]:

$$DN_{fused} = \frac{DN_{b1}}{DN_{b1} + DN_{b2} + DN_{bn}} DN_{hres} , \quad (1.28)$$

де DN_{b1} – значення сигналів в поточному пікселі i -го спектрального каналу; DN_{hres} – поточний піксел каналу високого розділення.

Аналіз головних компонент PCA широко застосовується в стисненні та кодуванні зображень, виділенні релевантних ознак, в тому числі – контурів зображень, виявленні міжкадрових різниць, послідовному комплексуванні підвищенні відношення сигнал/шум [70] тощо. Цей алгоритм є статистичним і полягає в перетворенні набору взаємно пов'язаних багатоваріантних даних в нову комбінацію некорельованих перемінних. Тобто багатовимірний простір координат замінюється на більш простий з набором ортогональних осей. Аналіз головних компонент включає в себе обчислення кореляційної або коваріаційної матриці,

власного вектора або характеристичного числа матриці, власне головних компонент. Зворотнє перетворення переводить набір даних в оригінальний параметричний простір. Кореляційні матриці викликають масштабування осей таким чином, що ознаки набувають одиничної дисперсії. Це дозволяє уникнути домінування одної з великих за абсолютним значення ознак в описі зображень. Збільшення простору ознак покращує результати обробки [13, 71].

Однією з найбільш вживаних методик з використанням алгоритму PCA є отримання високороздільного кольорового зображення шляхом заміщення головної компоненти спектральних каналів з низьким просторовим розділенням даними з панхроматичного каналу, причому просторова інформація залишається єдиною для всіх каналів, а спектральна є індивідуальною для кожного [72]. Замість процедури заміщення однієї з компонент іншою даний алгоритм використовується також для обрахування єдиного комплексованого зображення з набору [73].

Для запобігання погіршення результату обробки внаслідок малого об'єму простору ознак для кожного з інформаційних каналів виконується так зване декореляційне розширення. Воно полягає в переформатуванні мультиспектральної інформації в просторі головних компонент у кульове скупчення шляхом зміни масштабів осей [13, 74].

Ще одним методом підвищення просторової роздільної здатності є високочастотна фільтрація з селекцією спектральних каналів. Зазвичай ця процедура полягає в високочастотній фільтрації даних в каналі з високою роздільною здатністю і в наступному попиксельному додаванні отриманої інформації у каналах з низькою роздільною здатністю [70]. Одним з обмежень даної методики є небезпека втрати важливої інформації про текстури з зображенні під час фільтрації.

В результаті багаторазової регресії з набору змінних можна сформулювати змінну, що є максимально корельованою з незмінними даними. В комплексуванні зображень така процедура називається регресійним заміщенням змінних і використовується для визначення лінійної комбінації взаємозамінних інформаційних каналів. Звичайно, для ефективного комплексування одержана

лінійна комбінація має враховувати більшість релевантних ознак, що містяться у вхідних зображеннях. Цей алгоритм є досить розповсюдженим у задачах виявлення між кадрових різниць, наприклад, при супроводженні об'єктів [68].

Одним з алгоритмів заміщення є аналіз канонічних величин, який на основі існуючих інформаційних каналів і лінійних операторів дозволяє формувати композитні канали з максимальним значенням варіацій вимірюваних величин. Ця методика потребує також ефективного механізму визначення малозмінних областей на зображеннях [13, 75].

Потужним інструментом обробки зображень із змінною роздільною здатністю (multiresolution image processing) є вейвлет-перетворення [76, 77]. Значною перевагою цього інструменту порівняно з Фур'є перетворенням є локалізованість в площині об'єкту (зображення), недолік полягає в великій складності аналітичних обчислень. В основу вейвлет-перетворення покладені ієрархічні алгоритми згортки вхідного сигналу з деяким ядром із змінним масштабом. Такий підхід робить вейвлет-перетворення дуже ефективним при аналізі текстур, кодуванні сигналів, стеженні за об'єктами та розпізнаванні образів. З допомогою вейвлет-перетворення можна якісно комплексувати інформацію з каналів з різною роздільною здатністю, наприклад, «ОЕСС – радар з синтезованою апертурою». Основою комплексування з допомогою вейвлет-перетворення є накладення спектральної інформації низького розділення на інформацію високого розділення на етапі розкладу останньої по вейвлет-базисам. Це можна зробити заміщенням, додаванням або вибором відповідних коефіцієнтів [78, 79].

В ряді випадків одного алгоритму може бути не достатньо для вирішення задачі комплексування. Наприклад, це може бути при обробці зображень, що спотворені вібраціями, хмарністю та турбулентністю атмосфери, мають викривлену передачу кольорів тощо. В нагоді стають гібридні методики, яких існує дуже багато. Так можливі всілякі варіанти комбінацій методів композитних кольорів, IHS, аналізу головних компонент [80]. Наприклад, для комплексування видимого та ІЧ зображень широко застосовується поєднання методу IHS з арифметичними алгоритмами для покращення візуального сприйняття вихідного

зображення [81], або з аналізом головних компонент. Підсилення контурної інформації за рахунок високочастотної фільтрації і подальшого комплексування перемноженням телевізійного і радарного зображень [82] можуть значно покращити якість зорового сприйняття інформації [13].

Для кожної категорії комплексування використовують відповідні методи, що визначаються рівнем комплексування:

- пристрої комплексування на рівні пікселів (датчиків);
- пристрої комплексування на рівні релевантних ознак (узагальнених параметрів);
- пристрої комплексування на рівні прийняття рішень [13].

Рішення про застосування кожного з алгоритмів потрібно приймати в залежності від джерел інформації (категорії комплексування). Комплексування на рівні пікселів застосовується, коли джерела зображень близькі за своїми характеристиками, наприклад при комплексуванні зображень одного спектрального діапазону, але з різною роздільною здатністю, або отриманих в різний час. Комплексування на рівні релевантних ознак необхідно застосовувати, коли ступінь розбіжності між джерелами зображень вище, але області підвищеного інтересу можуть бути асоціативно пов'язані. Комплексування на рівні прийняття рішень застосовується в тих випадках, коли вхідні зображення значно відрізняються по своїм характеристикам одне від одного [42].

1.4.1 Комплексування на рівні пікселів

Методи комплексування на рівні пікселів є найбільш простими в плані математичних розрахунків, а отже й найбільш поширеними [13, 83]. При комплексуванні на рівні пікселів результуюче зображення отримуємо шляхом математичних операцій над окремими пікселями або невеликими по площі областями пікселів вхідних зображень. Необхідною умовою ефективності методів даної групи є якісна попередня реєстрація вхідних зображень. Схематичне зображення цього методу показано на рис.1.7.

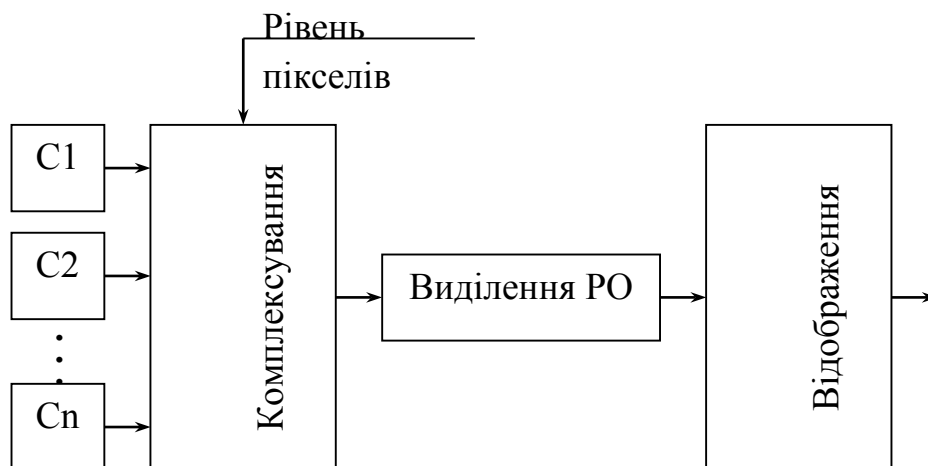


Рис. 1.7. Варіанти структур комплексування в ОЕСС: рівень пікселів

1.4.2 Комплексування на рівні ознак

Об'єктами для комплексування на рівні релевантних ознак є не окремі пікселі, а певні характерні області вхідних зображень. В даному випадку виділення релевантних ознак здійснюється незалежно в кожному каналі [13].

Методи комплексування на рівні релевантних ознак розвинуті значно менше і з'явилися значно пізніше, ніж алгоритми комплексування на рівні пікселів. Це пов'язано з обчислювальною складністю даних алгоритмів, а також відсутністю універсальних алгоритмів сегментації та розпізнавання. Проте алгоритми комплексування на рівні релевантних ознак мають суттєві переваги над алгоритмами комплексування на рівні пікселів, якщо застосовуються для обмеженого класу зображень. Основна різниця між алгоритмами даного класу полягає в принципі сегментації, що використовується для виділення характерних ознак вхідних зображень [84 - 86].

Схематичне зображення цього методу показано на рис.1.8.

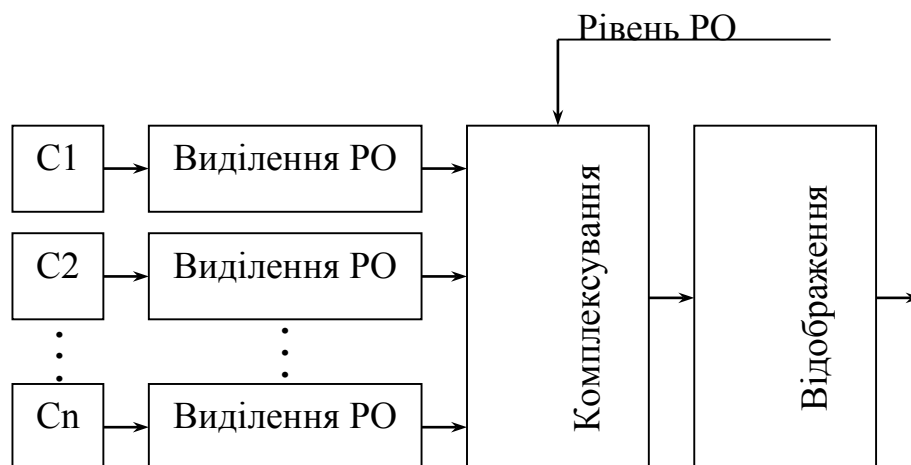


Рис. 1.8. Варіанти структур комплексування в ОЕСС: рівень ознак

1.4.3 Комплексування на рівні прийняття рішень

Комплексування на рівні прийняття рішень є менш поширеним та дещо ізольованим. Причиною цього є те, що результатом комплексування є не комбіноване зображення, а деяке судження, яке містить більш інформативний опис реальної картини [87 - 88]. Схематичне зображення цього методу показано на рис.1.9.

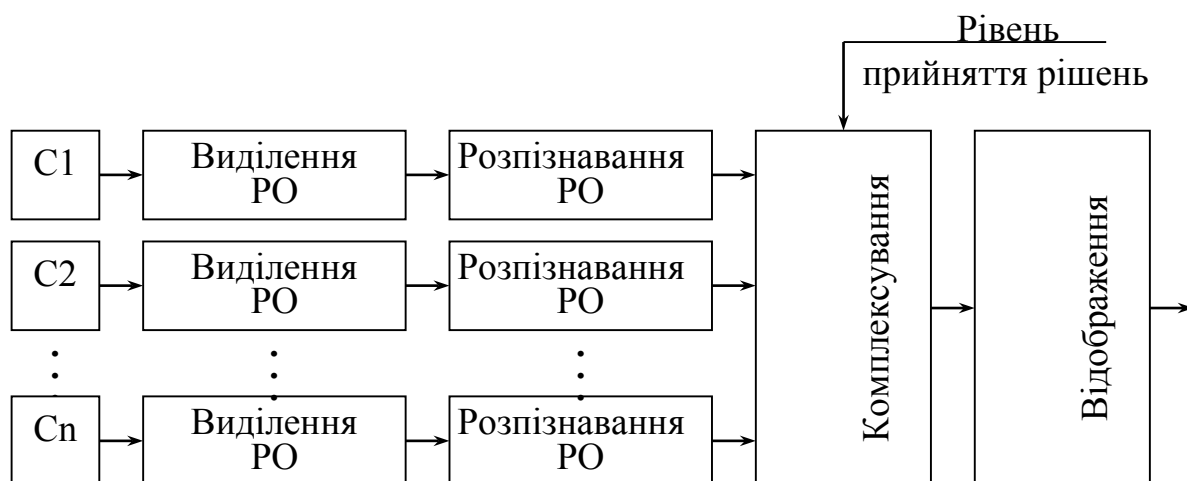


Рис. 1.9. Варіанти структур комплексування в ОЕСС: рівень прийняття рішень

1.4.4 Оптичні методи комплексування

Досить поширеним способом поєднання зображень різних візуальних каналів в одному полі зору є використання оптичних світлоподільників або спектроподільників. Розділення інформації можна проводити по амплітуді або по фронту світлової хвилі (рис.1.2). Більш докладно ці методи було розглянуто в підрозділі 1.2.2. Наприклад, в КП і ТП стрілецької зброї ці методи забезпечують безпосереднє комплексування. В разі, коли комплексування відбувається з перетворенням оптичного сигналу в електричний, оптичні методи об'єднання забезпечують реєстрацію зображень.

1.5 Узгодження елементів ОЕСС і каналів ОЕСС з комплексуванням

Процедура узгодження окремих елементів ОЕСС є обов'язковою в процесі проектування системи. Особливо важливою ця процедура є для складних систем з комплексуванням сигналів, адже узгодженню підлягають значно більше блоків системи [89, 90]. Для вузького класу задач спостереження можна також оптимізувати основні характеристики блоків ОЕСС. Для цього використовуються певні об'єктивні оцінки таких характеристик.

Для систем спеціального призначення однією з основних споживчих оцінок якості функціонування є дальність спостереження при заданій ймовірності виконання зорової задачі [91]. Математичне моделювання для визначення дальності спостереження є складною багатопараметричною задачею. Методи вирішення цієї задачі викладено в багатьох розрахункових моделях, таких як 1975 NVL, FLIR92, NVThermIP, TRM3, ACQUIRE, TOD тощо [92]. Ці моделі базуються на великому об'ємі експериментальних даних і працюють лише в межах окремих інформаційних каналів. Стандартною задачею узгодження блоків в межах інформаційних каналів є сумісний розрахунок енергетичних та просторових характеристик оптичної системи та ПВ. Відповідні алгоритми закладено в усі методи синтезу ТВ та ТПВ систем [91].

Показники якості комплексування (які докладно розглянуті в п.3.7) є відмінними від споживчих характеристик ОЕСС. Це ускладнює оцінку ефективності ОЕСС з комплексуванням для узгодження блоків різних каналів. Фактично наразі відсутній розрахунковий інструментарій узгодження параметрів блоків різних інформаційних каналів в ОЕСС з комплексуванням.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз сучасного стану оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень і наукових напрацювань щодо підвищення ефективності їх функціонування. Показано, що важливим напрямком удосконалення ОЕСС є покращення споживчих характеристик за рахунок використання кількох інформаційних каналів. Для дистанційних спостережень в наземних умовах загалом найдоцільніше використовувати двоканальні ОЕСС з ТВ і ТПВ каналами, а для космічних спостережень – відеоспектрометри.

2. Показано, що переваги багатоканальних ОЕСС на практиці можуть бути реалізованими за умови розроблення адекватних методів комплексування інформації в каналах з врахуванням того, що кінцевим споживачем інформації є людина-оператор. На сьогодні створено багато алгоритмів комплексування інформації, але в них не враховується специфіка утворення сигналу саме в оптико-електронних системах і особливості зорового сприйняття зображень при вирішенні різних задач спостереження.

3. Важливим етапом розроблення ОЕСС з комплексуванням є узгодження блоків різних інформаційних каналів між собою, а також основних блоків в межах одного каналу. Недостатня ефективність існуючих методів узгодження блоків ОЕСС з комплексуванням викликана відсутністю розрахункових методів моделювання перетворення й оцінки інформації в ОЕСС з комплексуванням.

4. Єдиний методологічний підхід до розроблення ефективних ОЕСС з комплексуванням має містити аналітичні засоби моделювання перетворень сигналів в системі «ФЦО – ОЕСС - спостерігач», оцінки ефективності

функціонування цієї системи, узгодження блоків ОЕСС між собою, механізми вибору найкращих методів комплексування, а також експериментальні засоби визначення основних характеристик ОЕСС.

5. Дослідження малогабаритних двоканальних прицільних ОЕСС з оптичним каналом показали, що всі моноблочні оптичні схеми переважають інші за узагальненим показником якості незалежно від типу оптичного суміщуючого пристрою; голографічні та меніскові схеми коліматорних прицілів мають переваги за масо-габаритними показниками над іншими схемами; а меніскові схеми переважають інші за узагальненим показником якості при використанні спектроподільників; телескопічні приціли на базі лінзової системи обернення переважають інші за узагальненим показником якості.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛАХ ОЕСС І АНАЛІЗУ ЗОБРАЖЕННЯ СПОСТЕРІГАЧЕМ

Візуальні спостереження призначено для оцінки стану окремих елементів ФЦО. Для цього інформація від об'єктів в просторі предметів збирається ОЕСС і відображається в полі зору оператора, який приймає рішення про стан цих об'єктів. Інформація переноситься сигналами у різній формі. В цьому сенсі сигнал є фізичним процесом, який переносить інформацію від об'єкта спостереження до суб'єкта прийняття рішення про стан об'єкта [2]. Зважаючи на функціональність системи «ОЕСС – оператор» будемо розглядати рішення задач виявлення, розпізнавання, ідентифікації об'єкта.

Для забезпечення достатньої ефективності ОЕСС розробляються фізико-математичні моделі формування оптичного сигналу об'єктом та його перетворення на шляху до оптико-електронної системи і в самій системі. Зважаючи на те, що на сьогодні переважна більшість важливої для користувачів візуальної інформації знаходиться в видимому та інфрачервоному діапазонах спектру, найбільший практичний інтерес становлять адекватні моделі формування зображень саме в цих спектральних діапазонах. Обов'язковою умовою достатнього рівня адекватності математичної моделі є можливість прогнозування поведінки сигналів як в окремих інформаційних каналах, так і при їх комплексуванні та сприйнятті зображення оператором.

Для вивчення структури і поведінки системи одним з найважливіших інструментів є математичне моделювання. Побудова математичної моделі ОЕСС вимагає вирішення проблеми опису основних множин, елементи яких впливають на її поведінку, і проблеми ідентифікації – визначення зв'язків між вхідними і вихідними сигналами з врахуванням міжелементних і міжпараметричних зв'язків.

Основною метою даного розділу є розвинення теорії та методів описання процесів перетворення видимого та ІЧ випромінювання від ФЦО до ОЕСС з

подальшим сприйняттям комплексованого зображення спостерігачем для його інтерпретації. Результатом має стати математична модель системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор».

2.1 Моделі формування інформації в окремих каналах ОЕСС

Найбільш зручним інструментом для аналізу інформаційного комплексу «ФЦО – ОЕСС – оператор» є передавальна функція, яку можна застосовувати тільки до лінійних інваріантних систем. Оскільки ОЕСС, як правило, призначені для спостережень ФЦО з невисокими контрастами яскравості у невеликих полях зору, то їх можна вважати лінійними інваріантними системами. Кожен елемент такої системи має свою передавальну функцію та модуляційну передавальну функцію (МПФ). МПФ узагальненої ОЕСС, згідно теорії лінійних систем, визначається добутком МПФ її окремих елементів [91]:

$$M_S(f_x, f_y) = M_A(f_x, f_y) M_O(f_x, f_y) M_D(f_x, f_y) M_M(f_x, f_y) \times \\ \times M_E(f_x, f_y) M_v(f_x, f_y), \quad (2.1)$$

де M_A , M_O , M_D , M_M , M_E , M_v – МПФ атмосфери, ОС, ПВ, монітора, спостерігача та руху платформи відповідно.

Структуру математичної моделі, подібно до фізичної моделі доцільно подати в вигляді кількох блоків, які є функціонально завершеними. Традиційно такими блоками є (рис.2.1) [42]:

- модель ФЦО, основними елементами якої є активні (АО) та пасивні (ПО) об'єкти, які знаходяться в полі зору ОЕСС, а також випромінюючі об'єкти за межами поля зору;
- модель траси розповсюдження сигналу, основними елементами якої є середовище, що заповнює об'єм від ФЦО до ОЕСС і випромінюючі об'єкти за межами поля зору;
- модель ОЕСС з урахуванням поточної задачі;

- модель спостерігача, яка окрім параметрів безпосередньо візуальної діяльності включає в себе умови спостереження і опис зорової задачі.

На виході моделі формується рішення. Його якість може апріорно задаватись в моделі спостерігача, або оцінюватись зовнішньою процедурою. В кожному блоці інформація переноситься фізичними сигналами і її тип зручно розглядати у відповідності з видом сигналу: оптичним випромінюванням широкого спектрального діапазону в ФЦО і на трасі розповсюдження, аналоговими і цифровими оптичними і електричними сигналами в ОЕСС, візуально сприйнятним оптичним випромінюванням в блоці спостерігача. Крім того на психічному рівні прийняття рішення доцільно враховувати додаткову інформацію, яка поступає в блок спостерігача, наприклад, від інших джерел інформації про ФЦО. Практично це здійснюється шляхом внесення відповідних змін в опис умов спостереження.

Беручи до уваги, що сигнали на вході й виході ОЕСС мають вид електромагнітного випромінювання, можна визначити характер релевантних параметрів, а отже – вид математичної моделі. Оптичне випромінювання характеризується інтегральною величиною потоку, спектральним складом, ступенем і видом поляризації, просторовим і часовим розподілами електромагнітної енергії. Зорова система спостерігача здатна аналізувати всі названі характеристики випромінювання окрім поляризаційних. Тому виправданим буде припустити, що математична модель ФЦО має описувати просторовий і спектральний розподіли енергії електромагнітного випромінювання на вході в ОЕСС, тобто носити «енергетичний» характер [13].

Поле опроміненості матричного приймача випромінювання (МПВ) в фокальній площині об'єктива ОЕСС є пропорційним полю яскравості в спряжених точках простору предметів. Яскравість кожної спряженої точки є суперпозицією яскравості окремих складових, які враховують:

- відбите об'єктом випромінювання Сонця;
- власне теплове випромінювання об'єкту і фону;
- розсіяне і власне випромінювання шару атмосфери на трасі спостереження [13].

Загалом системи з ОЕСС можна моделювати як в рамках традиційних аналогових безперервних уявлень, так і в рамках дискретних моделей. Перші є більш зручними для аналітичних розрахунків, другі дозволяють більш точно прогнозувати поведінку всієї системи за наявності помітних похибок за рахунок дискретизації.

При переході від видимого до ІЧ діапазону суттєво змінюється склад оптичного сигналу: видиме випромінювання містить практично тільки відбиту складову, ІЧ випромінювання ближнього діапазону – суміш відбитого та власного сигналів, ІЧ випромінювання середнього діапазону – переважну частину власного сигналу об'єкта. В багатьох випадках практичної реалізації ОЕСС дуже складно встановити зв'язок між зображеннями одного об'єкту в різних спектральних каналах. Крім того існує суттєва різниця між виділенням релевантних ознак малих (розміром від одного до кількох елементів просторового розділення) та протяжних зображень. В першому випадку найефективнішим параметром для алгоритмів виявлення об'єкта є контраст його зображення, а розпізнавання можна розглядати тільки в небагатьох специфічних ситуаціях. Протяжний об'єкт в задачах виявлення також часто характеризується контрастом, але для розпізнавання потребує інших (здебільшого – просторових) характеристик. Для всіх схем дистанційного спостереження окрім стереоскопічних (тобто для більшості практичних ситуацій) виправдано простір об'єктів відображати площиною. В такому разі важливим для опису об'єкта є не орієнтація і конфігурація формоутворюючих поверхонь, а тільки просторовий розподіл випромінювання, який є доступним ОЕСС [93].

Експериментальні дослідження впливу стану поляризації випромінювання на загальну картину ФЦО показали дуже невеликі значення корисної складової сигналу, що може бути викликаним малою чутливістю використовуваних методів реєстрації [94]. Отже математична модель перетворень сигналу в ОЕСС має містити енергетичну складову та просторово-частотну складову.

2.1.1 Утворення оптичного сигналу

ОЕСС як правило містить кілька МПВ, які працюють в вузьких спектральних піддіапазонах ($\Delta\lambda_1$ - $\Delta\lambda_n$). Найпростішим варіантом ОЕСС є двоканальна система з приймачами видимого та ІЧ діапазонів та з однаковою геометрією. В одному кадрі ОЕСС формується сигнал з $m \times n$ елементарних площадок площини об'єктів (рис. 2.2) [93].

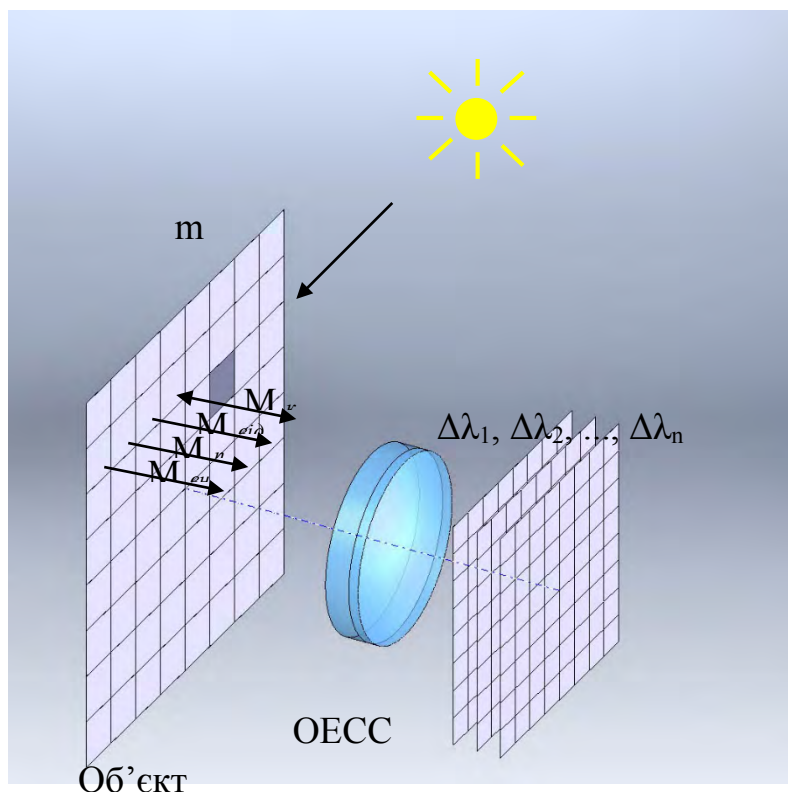


Рис. 2.2. Спрощена схема формування оптичного сигналу в ОЕСС

Спектральна енергетична світність випромінювання від кожної i -ї елементарної площадки площини об'єктів можна приблизно визначити за формулою [95]:

$$M_t^i(\lambda) = M_{вн}^i(\lambda) + M_n^i(\lambda) - M_k^i(\lambda) + M_{від}^i(\lambda), \quad (2.2)$$

де $M_{вн}^i(\lambda)$ - спектральна енергетична світність випромінювання за рахунок власної внутрішньої енергії; $M_n^i(\lambda)$ - спектральна енергетична світність випромінювання, що обумовлена поглинутою об'єктом зовнішньою енергією; $M_k^i(\lambda)$ - втрати випромінювання за рахунок конвекції; $M_{від}^i(\lambda)$ - спектральна енергетична світність відбитого від об'єкта випромінювання.

В найпростішому випадку об'єкт спостереження розміщено на рівномірному фоні, який характеризується альбедо ρ_b [96]. Об'єкт має коефіцієнт відбиття ρ_t , який перевищує альбедо на величину $\Delta\rho$. Цю величину можна визначити таким чином:

$$\Delta\rho = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t + \rho_b}. \quad (2.3)$$

Якщо об'єкт і фон мають поверхню, яка відбиває сонячне випромінювання за законом Ламберта, а Сонце створює на поверхні Землі спектральну освітленість $E_{0\lambda}$, то яскравість об'єкта і фону в робочому спектральному діапазоні ($\lambda_1 - \lambda_2$) буде дорівнювати

$$L_t = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_t(\lambda) E_{0\lambda}(\lambda) d\lambda; \quad L_b = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_b(\lambda) E_{0\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (2.4)$$

При цьому корисний сигнал формується за рахунок відмінності відбиваючої здатності поверхонь об'єкта і фону, тобто за рахунок абсолютного контрасту яскравості

$$\Delta L_e = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\rho_t(\lambda) - \rho_b(\lambda)] E_{0\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (2.5)$$

ТВ канал формує в просторі предметів контрасти об'єктів відносно фону за рахунок перевідбиття сонячної енергії у видимому діапазоні, що призводить до варіацій сигналу в залежності від стану зовнішнього освітлення [97, 98]. ТПВ канал має не змінний сигнал, тому що сприймає власне випромінювання об'єктів

відносно фону, яке змінюється дуже повільно. З іншого боку, денні та нічні умови спостереження в ТПВ каналі також можуть відрізнятися суттєво.

Окрім власного випромінювання ТПВ канал також може сприймати випромінювання модульоване коефіцієнтом відбиття, який змінюється в залежності від умов освітлення об'єкту [99].

Для кожного з каналів ТВ та ТПВ доцільно окремо розглядати умови функціонування вдень та вночі. Денні спостереження виконуються в умовах прямого сонячного освітлення або за наявності хмар.

Визначимо діапазон вхідних сигналів для ТВ каналу в умовах дня та ночі. В даному випадку задача полягає в визначенні загальних тенденцій і не є принциповим, які типи об'єктів або фонів використовуються. Для наочності в якості тест об'єкта використаємо алюмінієву пластину на фоні піску.

1) Денні спостереження. Вдень природним джерелом освітлення є Сонце, яке створює на поверхні об'єкту і фону максимально можливу освітленість

$$E_1 = \frac{\Phi_c}{A_t}, \quad (2.6)$$

де Φ_c - сонячний потік що падає на об'єкт, лм; A_t – площа об'єкту, або лінійного поля зору для фону, м².

Для об'єкта площею $A_t=1$ м², за умов прямого сонячного освітлення, інтегральний потік випромінювання на рівні моря, у видимому діапазоні спектру становить приблизно $\Phi_c=10^5$ лм.

Так як всі розрахунки в ТВ и ТПВ каналах необхідно виконувати в однакових енергетичних величинах, доцільно потік сонячного випромінювання з люменів перевести у Вати [97]:

$$E_1 = \frac{10^5}{683} = 146,4, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

В результаті відбиття об'єктом та фоном падаючого на них випромінювання, інтегральна поверхнева щільність випромінювання M при коефіцієнтах відбиття у видимому діапазоні $\rho_t = \rho_{Al} = 0,6$ та $\rho_b = \rho_{\pi} = 0,2$ становить для алюмінію та піску відповідно

$$M_{1t} = \rho_t \cdot E_1, \quad M_{1b} = \rho_b \cdot E_1, \quad (2.7)$$

тобто: $M_{1t} = 0,6 \cdot 146,4 = 87,8, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; M_{1b} = 0,2 \cdot 146,4 = 29,3, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$

В разі, якщо об'єкт є ламбертівським випромінювачем, його яскравість дорівнює

$$L_{1\text{TB}_t} = \frac{M_{1t}}{\pi}; L_{1\text{TB}_b} = \frac{M_{1b}}{\pi}. \quad (2.8)$$

В нашому випадку: $L_{1\text{TB}_t} = \frac{87,8}{3,14} = 30, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}; L_{1\text{TB}_b} = \frac{29,3}{3,14} = 9,3, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$

За поганих погодних умов, при захмареному небі, Сонце створює поверхневу щільність освітлення E_2 :

$$E_2 = \frac{\Phi_c}{A_t}, \quad (2.9)$$

де $\Phi_c = 29,2$ Вт - потік випромінювання що падає на об'єкт за поганих погодних умов.

$$\text{Отже } E_2 = \frac{29,2}{1\text{м}^2} = 29,2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Інтегральна світність M за наявності хмар

$$M_{2t} = \rho_t \cdot E_2, M_{2b} = \rho_b \cdot E_2, \quad (2.10)$$

$$\text{тобто } M_{2t} = 0,6 \cdot 29,2 = 17,5, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}; M_{2b} = 0,2 \cdot 29,2 = 5,8, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Яскравість об'єкту $L_{2\text{TB}_t}$ та фону $L_{2\text{TB}_b}$

$$L_{2\text{TB}_t} = \frac{M_{2t}}{\pi}, L_{2\text{TB}_b} = \frac{M_{2b}}{\pi}, \quad (2.11)$$

$$\text{тобто } L_{2\text{TB}_t} = \frac{17,5}{3,14} = 5,6, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}; L_{2\text{TB}_b} = \frac{5,8}{3,14} = 1,8, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

2) Нічні спостереження. Вночі природним джерелом освітлення у видимому діапазоні спектру є місяць. За гарних погодних умов, при відсутності хмар, він створює на поверхні об'єкту максимальну освітленість E_3

$$E_3 = \frac{\Phi_m}{A_t}, \quad (2.12)$$

де $\Phi_m = 2,9 \cdot 10^{-4}$, Вт – потік місячного випромінювання що падає на об'єкт та фон.

$$E_3 = \frac{2,9 \cdot 10^{-4}}{1\text{м}^2} = 2,9 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Інтегральна світність становить відповідно

$$M_{3t} = \rho_t \cdot E_3, \quad M_{3b} = \rho_b \cdot E_3, \quad (2.13)$$

тобто $M_{3t} = 0,6 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4} = 1,8 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$

$$M_{3b} = 0,2 \cdot 2,9 \cdot 10^{-4} = 5,8 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Яскравість об'єкту в цьому випадку становить $L_{3\text{ТВ}}$:

$$L_{3\text{ТВ}_t} = \frac{M_{3t}}{\pi}, \quad L_{3\text{ТВ}_b} = \frac{M_{3b}}{\pi}, \quad (2.14)$$

тобто $L_{3\text{ТВ}_t} = \frac{1,8 \cdot 10^{-4}}{3,14} = 5,7 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}};$

$$L_{3\text{ТВ}_b} = \frac{5,8 \cdot 10^{-5}}{3,14} = 1,8 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

За поганих погодних умов, при захмареному небі, місяць створює на поверхні об'єкту, мінімальну освітленість

$$E_4 = \frac{\Phi_M}{A_t}, \quad (2.15)$$

а, потік випромінювання що падає на об'єкт, становить $\Phi_M = 1,03 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$.

Отже $E_4 = \frac{1,03 \cdot 10^{-5}}{1 \text{ м}^2} = 1,03 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$

Інтегральна світність

$$M_{4t} = \rho_t \cdot E_4, \quad M_{4b} = \rho_b \cdot E_4; \quad (2.16)$$

$$M_{4t} = 0,6 \cdot 1,03 \cdot 10^{-5} = 6,2 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

$$M_{4b} = 0,2 \cdot 1,03 \cdot 10^{-5} = 2,06 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Яскравість ламбертівських випромінювачів становить

$$L_{4\text{ТВ}_t} = \frac{M_{4t}}{\pi}, \quad L_{4\text{ТВ}_b} = \frac{M_{4b}}{\pi}, \quad (2.17)$$

тобто $L_{4\text{ТВ}_t} = \frac{6,2 \cdot 10^{-6}}{3,14} = 1,97 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$

$$L_{4\text{ТВ}_b} = \frac{2,06 \cdot 10^{-6}}{3,14} = 6,5 \cdot 10^{-7}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

Визначимо діапазон вхідних сигналів для ТПВ каналу в умовах дня та ночі. ТПВ канал спостереження сприймає випромінювання від об'єктів і фонів, яке утворюється за рахунок власного випромінювання. За рахунок того, що в ІЧ

діапазоні коефіцієнт випромінювання алюмінію ($\varepsilon_t = \varepsilon_{Al} = 0,05$) є у багато разів меншим за коефіцієнт випромінювання піску ($\varepsilon_t = \varepsilon_{\pi} = 0,93$), зображення на екрані ТПВ каналу буде у вигляді темного квадрату на світлому фоні випромінюючого піску [97].

1. Нічні спостереження. Вночі при відсутності гідрометеорів погодні умови ніяк не впливають на енергетичну яскравість $L_{ТПВ}(\lambda, T)$ та на поверхневу щільність випромінювання $M(\lambda, T)$

$$M(\lambda, T) = \varepsilon \cdot \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}, \quad (2.18)$$

де ε - коефіцієнт випромінювання об'єкта; $c_1 = 37415$, Вт \cdot см $^{-2}$ \cdot мкм 4 ; $c_2 = 14388$ мкм \cdot К - постійні коефіцієнти; λ - довжина хвилі, мкм; T - температура об'єкту, К.

Оскільки спостереження ведеться вночі, то температура об'єкту визначається температурою оточуючого середовища, наприклад, повітря з $T = 283$ К.

Для об'єкту спостереження якого ведеться на довжині хвилі $\lambda = 11$ мкм, поверхнева щільність випромінювання складає:

$$M_{Al}(T) = 0,05 \cdot \frac{37415}{11^5 \left[\exp\left(\frac{14388}{11 \cdot 283}\right) - 1 \right]} = 1,154 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Для фону температура якого, наприклад, $T = 275$ К, поверхнева щільність випромінювання фону:

$$M_{\pi}(T) = 0,93 \cdot \frac{37415}{11^5 \left[\exp\left(\frac{14388}{11 \cdot 275}\right) - 1 \right]} = 1,873 \cdot 10^{-3}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Енергетична яскравість об'єкту, який вважається «сірим» ламбертівського типу, становить

$$L_{ТПВ 1}(T) = \varepsilon \cdot \frac{M(T)}{\pi}. \quad (2.19)$$

Об'єкт має енергетичну яскравість

$$L_{1ТПВ_t}(T) = 0,05 \cdot \frac{1,154 \cdot 10^{-4}}{3,14} = 1,838 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

Енергетична яскравість фону

$$L_{1ТПВ_b}(T) = 0,93 \cdot \frac{1,873 \cdot 10^{-3}}{3,14} = 5,547 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

2. Денні спостереження. Вдень джерелом освітлення об'єкту є Сонце і погодні умови (захмареність неба) починають впливати на енергетичну яскравість $L_{\text{ТПВ}}(\lambda, T)$ та на поверхневу щільність випромінювання $M(\lambda, T)$.

На протязі дня тепловий стан об'єкта та фону змінюватиметься як, при зміні загальної температури повітря, так і під дією прямого сонячного випромінювання. Підвищення температури почне впливати на показники енергетичної яскравості та поверхневої щільності випромінювання [97].

Для розрахунку поверхневої щільності випромінювання скористаємося формулою (2.18), вважаючи, що за рахунок конвекційного нагріву температура об'єкту підвищиться до 298 К для $\lambda = 11$ мкм

$$M_t(T) = 0,05 \cdot \frac{37415}{11^5 \left[\exp\left(\frac{14388}{11 \cdot 298}\right) - 1 \right]} = 1,46 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Поверхнева щільність випромінювання фону становить

$$M_b(T) = 0,93 \cdot \frac{37415}{11^5 \left[\exp\left(\frac{14388}{11 \cdot 298}\right) - 1 \right]} = 2,715 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Розрахуємо енергетичну яскравість за формулою (2.19)

$$L_{1\text{ТПВ}_t}(T) = 0,05 \cdot \frac{1,46 \cdot 10^{-4}}{3,14} = 2,325 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}},$$

$$L_{1\text{ТПВ}_b}(T) = 0,93 \cdot \frac{2,715 \cdot 10^{-4}}{3,14} = 8,041 \cdot 10^{-5}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

За гарних погодних умов, при відсутності хмар на небі, окрім власної енергетичної яскравості об'єкт почне перевипромінювати сонячне випромінювання, тобто слід враховувати як конвекційний нагрів від повітря, так і радіаційний нагрів сонячним випромінюванням. В результаті такого нагріву до 330К, наприклад, поверхнева щільність випромінювання об'єкту та фону становитиме при $\lambda = 11$ мкм [97]

$$M_t(T) = 0,05 \cdot \frac{37415}{11^5 \left[\exp\left(\frac{14388}{11 \cdot 330}\right) - 1 \right]} = 2,249 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2},$$

$$M_b(T) = 0,93 \cdot \frac{37415}{11^5 \left[\exp\left(\frac{14388}{11 \cdot 330}\right) - 1 \right]} = 4,183 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Розрахуємо енергетичну яскравість за формулою (2.19):

$$L_{1\text{ТПВ}_{t21}}(T) = 0,05 \cdot \frac{2,249 \cdot 10^{-4}}{3,14} = 3,581 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}},$$

$$L_{1\text{ТПВ}_b21}(T) = 0,93 \cdot \frac{4,183 \cdot 10^{-4}}{3,14} = 1,239 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

Крім того, пряме сонячне випромінювання відбивається від об'єкта та фону.
Для об'єкта та фону з дифузним характером відбиття

$$L_{1\text{ТПВ}_t22}(T) = \rho_t \cdot \frac{M_t}{\pi}, \quad L_{1\text{ТПВ}_b22}(T) = \rho_b \cdot \frac{M_b}{\pi}. \quad (2.20)$$

Враховуючи, що алюміній та пісок мають коефіцієнти відбиття в ІЧ діапазоні $\rho_{Al} = 0,95$, $\rho_{\Pi} = 0,07$, маємо

$$L_{1\text{ТПВ}_t22}(T) = 0,95 \cdot \frac{2,249 \cdot 10^{-4}}{3,14} = 6,79 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}},$$

$$L_{1\text{ТПВ}_b22}(T) = 0,07 \cdot \frac{4,183 \cdot 10^{-4}}{3,14} = 0,93 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}.$$

Сумарна яскравість об'єкта становитиме суму двох вказаних складових:

$$L_{2\text{ТПВ}_t}(T) = L_{1\text{ТПВ}_t21}(T) + L_{1\text{ТПВ}_t22}(T) = 4,333 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}. \quad (2.21)$$

Аналогічно сумарна яскравість фону:

$$L_{2\text{ТПВ}_b}(T) = L_{1\text{ТПВ}_b21}(T) + L_{1\text{ТПВ}_b22}(T) = 3,903 \cdot 10^{-4}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}. \quad (2.22)$$

Всі показники енергетичної яскравості у різних умовах спостереження наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Показники енергетичної яскравості за різних умов спостереження [97]

ТВ канал , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$		ТПВ канал, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$	
Ніч			
Місяць $L_t=5,7 \cdot 10^{-5}$ $L_b=1,8 \cdot 10^{-5}$	Хмари $L_t=1,97 \cdot 10^{-6}$ $L_b=6,5 \cdot 10^{-7}$	Місяць $L_t=1,838 \cdot 10^{-6}$ $L_b=5,547 \cdot 10^{-4}$	Хмари $L_t=1,838 \cdot 10^{-6}$ $L_b=5,547 \cdot 10^{-4}$
День			
Сонце $L_t=30$ $L_b=9,3$	Хмари $L_t=5,6$ $L_b=1,8$	Сонце $L_t=4,333 \cdot 10^{-4}$ $L_b=3,903 \cdot 10^{-4}$	Хмари $L_t=2,325 \cdot 10^{-6}$ $L_b=8,041 \cdot 10^{-5}$

Контраст визначимо із формули (2.3) як

$$K = \frac{L_t - L_b}{L_t + L_b}. \quad (2.23)$$

Розраховані для ТВ та ТПВ каналів контрасти наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Значення контрастів для ТВ та ТП каналів

Умови спостереження	ТВ контрасти		ТПВ контрасти	
Ніч місячна	K ₁	0,52	K ₅	-0,993
Ніч хмарна	K ₂	0,504	K ₆	-0,993
День сонячний	K ₃	0,527	K ₇	0,052
День хмарний	K ₄	0,514	K ₈	-0,944

Порівняння результатів, що наведені в таблицях 2.1 і 2.2, показує суттєву відмінність формування сигналів в каналах. У ТВ каналі за різних зовнішніх умов сильно змінюється освітленість вхідної зіниці об'єктива ОЕСС, але вхідний контраст залишається майже постійним. В ТПВ каналі під дією радіаційного нагріву може виникати реверс контрасту, що значно змінює картину простору об'єктів. Очевидно, що такі умови вимагають зміни алгоритму комплексування зображень [97].

Тобто при дистанційному зондуванні в типових випадках контрасти ТПВ зображень можуть значно перевищують контрасти в видимому діапазоні спектру.

Ситуація змінюється при стаціонарних спостереженнях в лабораторних умовах. Якщо об'єктом спостереження є біологічний об'єкт (частіше – людина), то формування інформативного оптичного сигналу зазвичай відбувається під дією певного запального процесу. Запальні процеси і посилення кровотоку викликають підвищення температури, а дегенеративно-дистрофічні процеси і зниження кровотоку призводять до локального зниження температури в ураженій області. Можна спрощено визначити температурний контраст ІЧ випромінювання в аномальній зоні організму людини величиною 0,2°C [100].

2.1.2 Перетворення оптичного сигналу на трасі розповсюдження

Оптичний сигнал ФЦО зазнає просторового і енергетичного спотворення при проходженні через атмосферу: разом з ослабленням інтенсивності відбуваються і

структурні спотворення сигналу, які в першу чергу зумовлені наявністю температурного градієнту в повітрі та турбулентністю. Ослаблення випромінювання викликане, в основному, поглинанням молекулами атмосферних газів; розсіюванням на молекулах, аерозолях і розсіюючих частинках, що присутні в атмосфері; ослабленням на так званих гідрометеорах (в тумані і в хмарах, під час дощу або снігу).

Для розрахунку спектральних функцій пропускання атмосфери доцільно застосувати спрощену методику. Спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери на трасі обчислюється за формулою

$$\tau_A(\lambda) = \exp(-\tau_A), \quad (2.24)$$

де τ_A - оптична товщина атмосфери.

У даній моделі загальна оптична товщина складається з трьох складових:

$$\tau_A = \tau_{mn} + \tau_a + \tau_p, \quad (2.25)$$

де τ_{mn} - оптична товщина, яка обумовлена молекулярним поглинанням; τ_a - оптична товщина, яка обумовлена аерозольним ослабленням; τ_p - оптична товщина, яка обумовлена молекулярним розсіюванням.

У вхідний блок двоканальної ОЕСС поступає електромагнітне випромінювання широкого безперервного спектру. Двовірний просторовий розподіл потоку якого визначається формулою [13]:

$$\Phi_e(\lambda, x, y) = \tau_A(\lambda) L_{et}(\lambda, x, y) A_t \Omega_o, \quad (2.26)$$

де $\tau_A(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; $L_{et}(\lambda, x, y)$ - двовірний просторовий розподіл середнього значення спектральної яскравості простору предметів; Ω_o - тілесний кут поля зору ОЕСС; A_t – площа вхідної зіниці об'єктива ОЕСС.

Величину $L_{et}(\lambda, x, y)$ при дистанційному зондуванні в умовах поганого пропускання атмосфери слід розглядати не тривимірною, а чотиривимірною. Для цього є дві основні передумови: по-перше, фактично існує глибина простору, на якій оператор здатен задовільно оцінювати обстановку – поточний інформативний шар простору предметів. В умовах задимленості, туману, тощо при переході від

одного шару до іншого суттєво змінюється пропускання та власне випромінювання атмосфери. По-друге, об'єкти, що на одній відстані несли корисний сигнал, заважатимуть спостерігати об'єкти на інших відстанях, тобто стануть завадами. Тому доцільно формулу (2.26) застосовувати для кожного i - го інформативного шару простору предметів (рис. 2.3).

Для обчислення можна скористатись методикою, запропонованою в [101]. На вхідну зіницю об'єктива ОЕСС поступатиме двовірний просторовий розподіл монохроматичного потоку:

$$\Phi(\lambda, x, y) = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left[(1 - \tau_{Ai}(\lambda)) \cdot L_{Ami}(\lambda) \right] + L_{Api}(\lambda) \right] \cdot \prod_{j=1}^{i-1} \tau_{Aj}(\lambda) \right\} + \sum_{i=1}^n \left[L_{eti}(\lambda, x, y) \cdot \prod_{j=1}^i \tau_{Aj}(\lambda) \right] \cdot \Omega_o \cdot A_t \quad (2.27)$$

де $\tau_{Ai}(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт пропускання i - го шару атмосфери; $L_{Ami}(\lambda)$ - спектральна яскравість власного теплового випромінювання i - го шару атмосфери, яка моделюється абсолютно чорним тілом з коефіцієнтом випромінювання $(1 - \tau_{Ai}(\lambda))$; $L_{Api}(\lambda)$ - спектральна яскравість розсіяного випромінювання i - го шару атмосфери; $L_{eti}(\lambda, x, y)$ - середнє значення спектральної яскравості простору предметів, які знаходяться в i - му інформативному шарі [13].

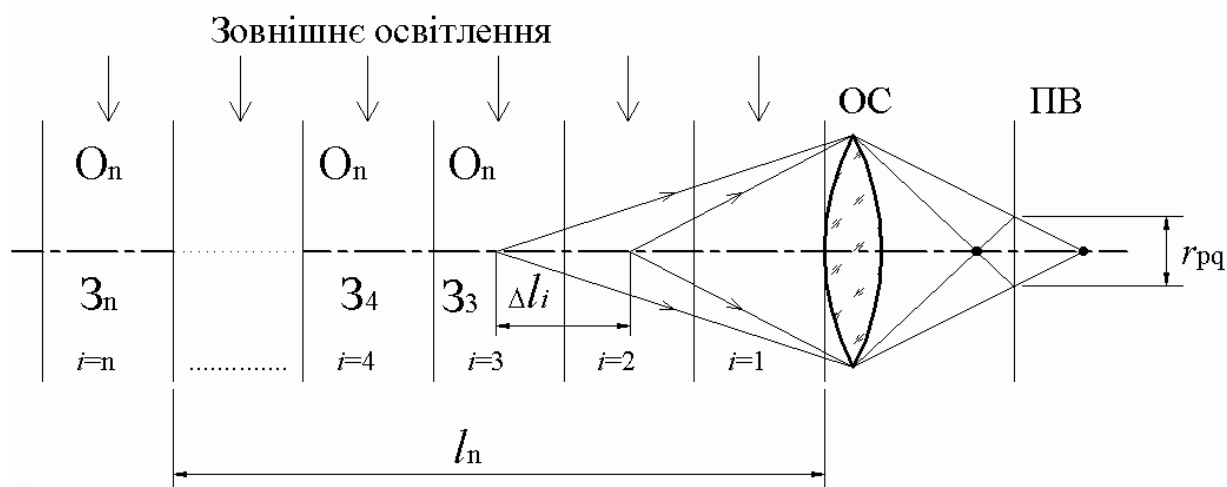


Рис. 2.3. Пошарова модель атмосфери

В формулі (2.27) атмосферна складова випромінювання i -го шару домножається на коефіцієнт пропускання всіх шарів від 1-го до $(i-1)$ -го, а предметна складова враховує також коефіцієнт пропускання шару, в якому знаходиться предмет.

При спостереженні через шар турбулентної атмосфери відбувається спотворення зображення об'єктів, величина якого визначається МПФ атмосфери [102] $M_A(\nu_x)$. Але практика дистанційних спостережень з використанням ОЕСС показує, що фазові спотворення, що викликані нерівномірністю МПФ атмосфери, є значно менш суттєвими, ніж енергетичні втрати.

2.1.3 Формування зображення на приймачі випромінювання

Оптична система ОЕСС перетворює потік електромагнітного випромінювання в розподіл освітленості чутливої площадки ПВ. Найважливіший елемент ОЕСС – об'єктив - моделюється такими параметрами [96]: фокусною відстанню f'_o ; відносним отвором D_p / f'_o або ефективним діафрагмовим числом k_{eff} ; полями зору – кутовим $2\omega_0$, лінійним в просторі предметів (на поверхні Землі) $X \times Y$, лінійним в просторі зображень (в площині ПВ) $X' \times Y'$; робочим спектральним діапазоном з урахуванням відповідного каналу пристрою формування спектральних каналів $(\lambda_1 - \lambda_2)$; спектральним $\tau_o(\lambda)$ й інтегральним τ_o коефіцієнтами пропускання відповідного спектрального каналу.

Геометричне поле зору ОЕСС визначається розмірами ПВ і фокусною відстанню об'єктива. В сучасних ОЕСС практично не використовуються системи сканування.

При відсутності він'єтування променів в об'єктиві та перпендикулярному до осі спостереження розміщенні випромінюючої поверхні об'єкта, на вхідну зіницю об'єктива відповідно до (2.26) надходить спектральний потік випромінювання

$$\Phi_e(\lambda) = \frac{1}{\pi} \tau_A(\lambda) A_t \Omega_o \varepsilon_t(\lambda) M_\lambda(\lambda, T_t), \quad (2.28)$$

де $\varepsilon_t(\lambda)$ - спектральний коефіцієнт випромінювання об'єкта; $M_\lambda(\lambda, T_t)$ - спектральна щільність випромінювання АЧТ, що визначається формулою (2.18).

Об'єktiv формує зображення об'єкта і фону в площині ПВ з контрастом освітленості

$$\Delta E' = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) E'_{0\lambda}(\lambda) [\rho_t(\lambda) - \rho_b(\lambda)] d\lambda. \quad (2.29)$$

Спектральна енергетична освітленість $E'_{0\lambda}(\lambda)$, яка формується на чутливій поверхні ПВ при заданій енергетичній яскравості об'єкта L_{et} , для осьової точки осесиметричної ОС визначається формулою

$$E'_{0\lambda}(\lambda) = \frac{\pi \cdot \tau_A(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot L_{et}(\lambda)}{4k_{eff}^2 \left(1 - \frac{\beta'}{\beta_p} \right)^2}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{мкм}}, \quad (2.30)$$

де $\tau_o(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання ОС; k_{eff}^2 - ефективне діафрагмове число:

$$k_{eff}^2 = \frac{f_o'^2}{D_p^2 - D_i^2}, \quad (2.31)$$

де для коаксіальних осесиметричних об'єktivів D_p і D_i є зовнішнім і внутрішнім діаметрами вхідної зіниці відповідно (для лінзових та позаосьових об'єktivів $D_i = 0$). Для дзеркального об'єktivа у випадку, коли об'єкт розташований у нескінченності, діаметр D_i дорівнює діаметру контррефлектора.

На відстані від осьової точки освітленість ПВ зменшується. У першому наближенні ця залежність описується виразом

$$E_e'(\omega') = E_{e0}' \cdot \cos^4 \omega', \quad (2.32)$$

де ω' – кут напрямку на випромінювач у просторі зображень.

Як показано раніше, енергетичне розділення ТВ каналів можна визначати мінімальним контрастом коефіцієнта відбиття об'єкта на фоні $\Delta \rho_n$. Для прикладу розглянемо ОЕСС з такими параметрами [96]: об'єktiv з фокусною відстанню

$f'_o = 850$ мм, діаметром вхідної зіниці $D_p = 200$ мм, коефіцієнтом пропускання $\tau_o = 0,8$ в робочому спектральному діапазоні $(\lambda_1 - \lambda_2) = (0,5 - 0,76)$ мкм; ПВ - кремнієва ПЗЗ-лінійка типу CCD 151 з кількістю пікселів $N_D = 5000$; розміром пікселя $V_D \times W_D = 7 \times 7$ мкм. Тактова частота зчитування становить $f_d = 5$ МГц, експозиція, що є еквівалентною середньому квадратичному значенню шуму, дорівнює $H_n = 2 \cdot 10^{-10}$ Дж \cdot см $^{-2}$.

Радіометричне розділення $\Delta\rho_n = \rho_t - \rho_b$ ОЕСС визначимо за формулою

$$\Delta\rho_n = \frac{4H_n}{\tau_A \tau_o E_0 t_i} \left(\frac{f'_o}{D_p} \right)^2, \quad (2.33)$$

де $H_n = 2 \cdot 10^{-6}$ Дж \cdot м $^{-2}$ – експозиція, що є еквівалентною середньому квадратичному значенню шуму; $t_i = N_D / f_d = 10^{-3}$, с – час інтегрування.

Із табл. 3.10 методом інтерполяції [91], знаходимо середню освітленість, яку Сонце формує на рівні моря при зенітному куті Сонця 60° в спектральному діапазоні $(\lambda_1 - \lambda_2) = (0,5 - 0,76)$ мкм. Вона дорівнює $E_0 = 295,3$ Вт/м 2 .

При вертикальній трасі спостереження середній коефіцієнт пропускання атмосфери в безхмарну погоду в спектральному діапазоні $(\lambda_1 - \lambda_2) = (0,5 - 0,76)$ мкм дорівнює приблизно 0,5 [91]. Після підстановки вихідних параметрів в вираз (2.33) отримаємо значення енергетичного розділення ОЕСС

$$\Delta\rho_n = \frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 4,25^2}{0,5 \cdot 0,8 \cdot 295,3 \cdot 10^{-3}} = 1,2 \cdot 10^{-3}.$$

Фокусна відстань об'єктива обирається із умови забезпечення просторового розділення ОЕСС [103]. Тому забезпечити задане енергетичне розділення можна за рахунок вибору діаметра вхідної зіниці D_p об'єктива. На рис. 2.4 наведена залежність енергетичного розділення $\Delta\rho_n$ ОЕСС від діаметра вхідної зіниці D_p .

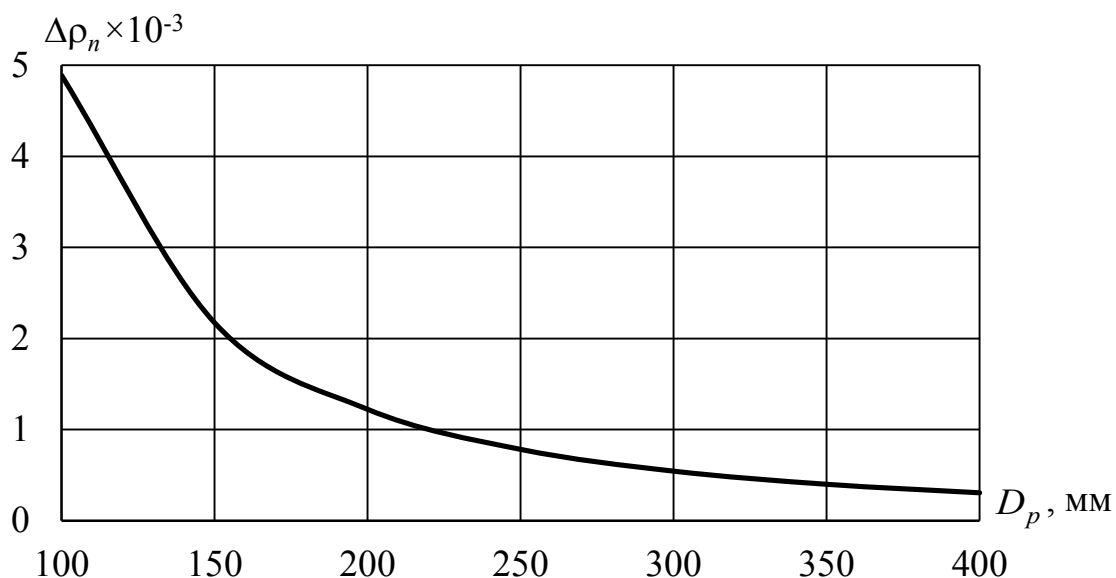


Рис. 2.4. Залежність енергетичного розділення сканера $\Delta\rho_n = \rho_t - \rho_b$ від діаметра вхідної зіниці об'єктива D_p

Сучасні ОЕСС дозволяють змінювати кут візування, який визначається кутом між оптичною віссю ОЕСС і надиром. Однак при цьому виникають значні спотворення зображення, що обумовлені відмінністю кута між віссю візування і поверхнею Землі від 90° [104].

Розглянемо МПФ вхідного блоку ОЕСС, який у відповідності до (2.1) вважатимемо інваріантною лінійною системою, одновимірною МПФ $M_s(v_x)$ якої визначається добутком МПФ об'єктива $M_O(v_x)$ і ПВ $M_D(v_x)$, тобто

$$M_s(v_x) = M_O(v_x)M_D(v_x), \quad (2.34)$$

де v_x – просторова частота в площині ПВ.

МПФ для високоякісних об'єктів зручно апроксимувати функцією [105]

$$M_O(v_x) = 1 - 1,22k_{eff}\lambda \frac{v_x}{\eta_{di}}, \quad (2.35)$$

де η_{di} – параметр апроксимації, який визначає відмінність реальної МПФ від дифракційно обмеженої за певного контрасту.

Через те, що чутлива площадка лінійки ПВ має кінцеві розміри $V_D \times W_D$, а сам приймач має постійну часу t_D , його МПФ описують добутком [105]

$$M_D = M_{Ds} M_{Dt}, \quad (2.36)$$

де $M_{Ds}(v_x) = \text{sinc}(V_D v_x)$ – просторова МПФ; $M_{Dt} \approx 1$ – часова МПФ. Тому будемо вважати, що

$$M_D(v_x) = \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}, \quad (2.37)$$

де V_D – розмір пікселя.

Тоді МПФ ОЕСС з урахуванням (2.35) і (2.37) описується функцією

$$M_s(v_x) = \left(1 - 1,22 k_{eff} \lambda \frac{v_x}{\eta_{di}} \right) \frac{\sin(\pi V_D v_x)}{\pi V_D v_x}. \quad (2.38)$$

Формула (2.37) МПФ ПВ є справедливою для випадку, коли оптична вісь ОЕСС є перпендикулярною до поверхні Землі. При відхиленні оптичної осі від надиру площина об'єктів і оптична вісь ОЕСС утворює кут візування θ_v , що призводить до погіршення якості зображення і збільшення розмірів елемента просторового розділення на поверхні Землі (рис. 2.5). При цьому на краю поля зору розміри елемента $\delta V \times \delta W$ розділення на поверхні Землі збільшуються.

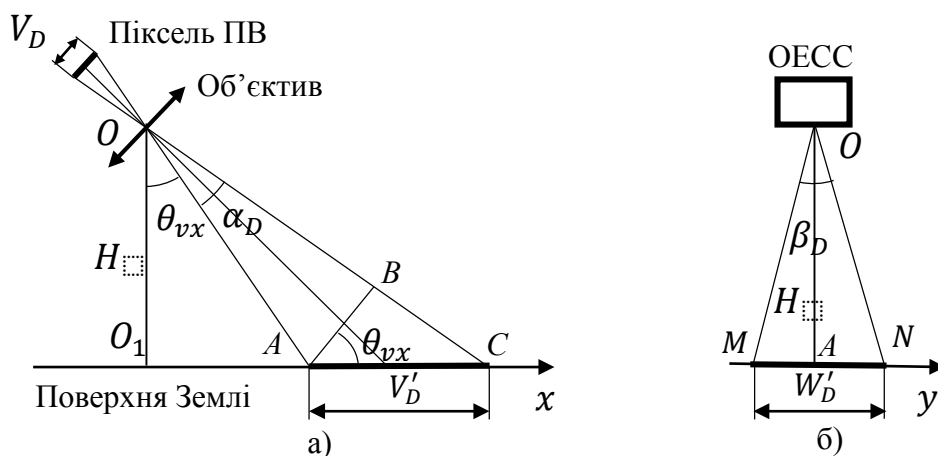


Рис. 2.5. Геометрична схема для визначення просторового розділення

ОЕСС на поверхні Землі при відхиленні оптичної вісі від вертикалі на кут θ_{vx} уздовж осі x : а) – схема для визначення елемента розділення уздовж осі x ; б) – схема для визначення елемента розділення уздовж осі y

Розглянемо одновимірний випадок для визначення розміру елемента розділення при відхиленні осі візування від надира на кут θ_{vx} уздовж осі x (рис. 2.5, а). МПФ ПВ буде визначатися за формулою (2.37).

Визначимо розміри елемента розділення ОЕСС на поверхні Землі при відхиленні оптичної осі на кут θ_{vx} в напрямку, перпендикулярному напрямку польоту супутника (рис. 2.5, а).

Із трикутника ABC визначаємо розмір $\delta V = V'_D$ елемента розділення уздовж осі x , який є проекцією чутливої площадки пікселя на поверхню Землі.

$$\delta V = V'_D = \frac{AB}{\cos \theta_{vx}}. \quad (2.39)$$

Відрізок AB знайдемо із трикутника ABO

$$AB = OA \sin \alpha_D \approx OA \cdot \alpha_D, \quad (2.40)$$

а відрізок OA - із трикутника OO_1A - дорівнює

$$OA = \frac{OO_1}{\cos \theta_v}, \quad (2.41)$$

де $OO_1 = H$ – висота польоту супутника; α_D – кутовий розмір чутливої площадки пікселя.

Після підстановки (2.40) і (2.41) в (2.39) визначаємо розмір елемента розділення за кутом візування θ_{vx}

$$\delta V = V'_D = \frac{H \alpha_D}{\cos^2 \theta_{vx}} = \frac{H V_D}{f'_o \cos^2 \theta_{vx}}. \quad (2.42)$$

Розмір цього елемента $\delta W = W'_D$ уздовж осі y визначимо із рис. 2.5, б). Із трикутника OMN маємо

$$\delta W = W'_D = OA \cdot \beta_D = \frac{W_D H}{f'_o \cos \theta_{vx}}. \quad (2.43)$$

Аналогічні співвідношення можна отримати і при відхиленні осі візування від надира уздовж осі y на кут θ_{vy}

$$\delta V = V'_D = \frac{HV_D}{f'_o \cos \theta_{vy}} \quad \delta W = W'_D = \frac{W_D H}{f'_o \cos^2 \theta_{vy}}. \quad (2.44)$$

Визначимо відмінність протилежних сторін елемента розділення при відхиленні оптичної осі на кути θ_{vx} і $\theta_{vy} = 0$, використовуючи формулу (2.42). Якщо перша сторона елемента розділення визначається за формулою (2.42), то при збільшенні кута візування на величину $d\theta_{vx} = \alpha_D$ протилежна сторона збільшиться на величину

$$d(\delta V) = \frac{2HV_D \sin \theta_{vx}}{f'_o \cos^3 \theta_{vx}} d\theta_{vx}. \quad (2.45)$$

Відносне збільшення протилежної сторони становить

$$\frac{d(\delta V)}{\delta V} = 2\alpha_D \operatorname{tg} \theta_{vx}. \quad (2.46)$$

Для кутів візування $\theta_{vx} = 35^\circ$ і миттєвого поля зору $\alpha_D = 8$ мкрад відносне збільшення протилежної сторони дорівнює $0,9 \cdot 10^{-4}$, тобто виконується умова $d(\delta V) \ll \delta V$. Це означає, що елемент розділення ОЕСС на поверхні Землі можна розглядати у вигляді прямокутника розміром $\delta V \times \delta W$, сторони якого визначаються формулами (2.43) і (2.44). Тоді площа елемента розділення становитиме

$$\delta S = \frac{HV_D}{f'_o \cos^2 \theta_{vx}} \frac{W_D H}{f'_o \cos \theta_{vx}} = \left(\frac{H}{f'_o} \right)^2 \frac{S_D}{\cos^3 \theta_{vx}}, \quad (2.47)$$

де $S_D = V_D \cdot W_D$ – площа пікселя ПВ.

У ОЕСС з лінійними рядковими ПВ розклад зображення по другій координаті у здійснюється за рахунок власного руху платформи. За період рядкової розгортки t_l , або час інтегрування (накопичення заряду) t_i в ПВ з системою TDI, зображення лінійки на поверхні Землі зміститься на величину

$$dy = v_f t_l, \quad (2.48)$$

де $v_f = 6,8$ км/с – швидкість руху підсупутникової точки по земній поверхні.

Величину dy можна вважати просторовим розділенням уздовж напрямку руху супутника. Величину dy можна змінювати шляхом зміни тактової частоти

зчитування f_d , або часу інтегрування t_i . При цьому слід пам'ятати, що із збільшенням частоти f_d зменшується час накопичення заряду в ПЗЗ-лінійці, а значить і енергетичне розділення ОЕСС.

Із рис. 2.5, а) визначаємо приведений розмір елемента розділення

$$V_{Dv} = V'_{Dv} \frac{f'_o \cos \theta_{vx}}{H} = \frac{HV_D}{f'_o \cos^2 \theta_{vx}} \frac{f'_o \cos \theta_{vx}}{H} = \frac{V_D}{\cos \theta_{vx}}. \quad (2.49)$$

Тоді МПФ лінійного ПВ для довільних кутів візування матиме вигляд

$$M_{Dv}(v_x) = \frac{\sin\left(\pi \frac{V_D v_x}{\cos \theta_{vx}}\right)}{\pi \frac{V_D v_x}{\cos \theta_{vx}}}. \quad (2.50)$$

Для ОЕСС з вказаними раніше параметрами, встановленої на космічному апараті з висотою орбіти $H = 680$ км, розрахуємо МПФ при різних кутах візування [104]. Кути візування ОЕСС відносно надиру складають впоперек польоту космічного апарату $\theta_{vx} = \pm 35^\circ$, уздовж польоту – $\theta_{vy} = \pm 25^\circ$.

Розрахуємо кутове поле зору ОЕСС. Довжина лінійки ПВ становить $l_D = V_D N_D = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 5000 = 35$ мм. Тоді

$$2\omega_o = 2\omega_{ox} = V_D N_D = 2 \arctg \frac{35}{1700} = 0,041 \text{ рад} = 2,4^\circ.$$

Розміри елемента розділення на поверхні Землі визначимо при скануванні уздовж осі x за формулами

$$\delta V = \frac{HV_D}{f'_o \cos^2 \theta_{vx}} = \frac{680 \cdot 10^3 \cdot 7 \cdot 10^{-6}}{850 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{\cos^2 \theta_{vx}} = 5,6 \frac{1}{\cos^2 \theta_{vx}}, \text{ м};$$

$$\delta W = \frac{W_D H}{f'_o \cos \theta_{vx}} = \frac{680 \cdot 10^3 \cdot 7 \cdot 10^{-6}}{850 \cdot 10^{-3}} \frac{1}{\cos \theta_{vx}} = 5,6 \frac{1}{\cos \theta_{vx}}, \text{ м}.$$

На рис. 2.6 наведено графіки залежності розміру $\delta V \times \delta W$ елемента розділення від кута візування θ_{vx} . З отриманих розрахунків видно, що в надирі елемент розділення має форму квадрата із стороною 5,6 м; на краю поля зору ОЕСС, коли $\omega_o = 1,2^\circ$, а кут візування $\theta_{vx} = 0^\circ$, елемент розділення наближено має форму

прямокутника розміром $5,61 \times 5,6 \text{ м}^2$; на оптичній осі ОЕСС, коли $\omega_o = 0^\circ$, при максимальному куті візування $\theta_{vx} = 35^\circ$ елемент розділення наближено має форму прямокутника розміром $8,3 \times 6,8 \text{ м}^2$.

Аналогічні результати можна отримати при відхиленні оптичної осі від надира на кут θ_{vy} уздовж польоту космічного апарату: в надирі елемент розділення має форму квадрата із стороною $5,6 \text{ м}$; на краю поля зору ОЕСС, коли $\omega_o = 1,2^\circ$, а кут візування $\theta_{vy} = 0^\circ$, елемент розділення наближено має форму прямокутника розміром $5,61 \times 5,6 \text{ м}^2$; на оптичній осі ОЕСС, коли $\omega_o = 0^\circ$, при максимальному куту візування $\theta_{vy} = 25^\circ$ елемент розділення наближено має форму прямокутника розміром $6,2 \times 6,8 \text{ м}^2$.

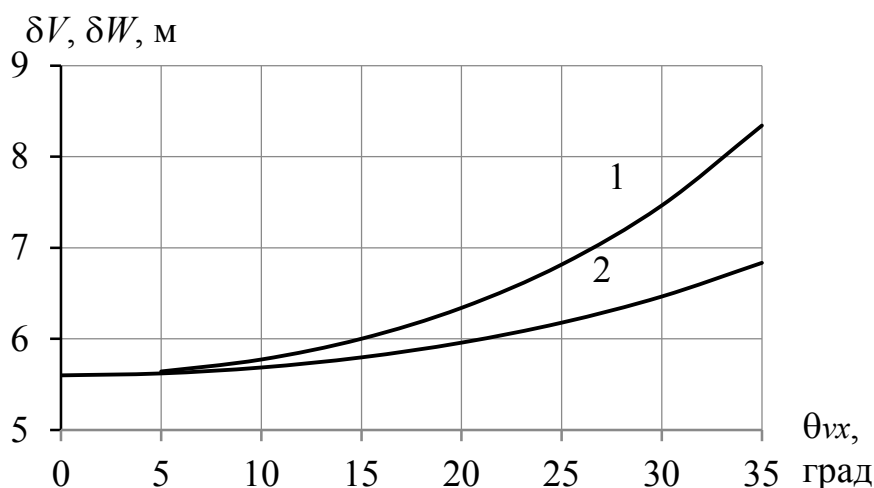


Рис. 2.6. Залежність розміру $\delta V \times \delta W$ елемента розділення ОЕСС в площині об'єктів в центрі поля зору від кута візування θ_{vx} : 1 – впоперек польоту супутника; 2 – уздовж польоту

Якщо взяти до уваги, що точка надира переміщується із швидкістю $v_f = 6,8 \text{ км/с}$, то розмір елемента δW уздовж координати y збільшиться на величину

$$\Delta W = v_f t_f, \quad (2.51)$$

де t_f – період зчитування сигналу в лінійці ПВ:

$$t_f = \frac{N_d}{f_d} = \frac{5000}{5 \cdot 10^6} = 10^{-2} \text{ с.}$$

Тоді маємо $\Delta W = 6,8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 6,8 \text{ м.}$ Тобто просторове розділення ОЕСС значно погіршується.

Величину ΔW можна зменшити за рахунок роботи лінійки ПВ в режимі накопичення (TDI) з часом інтегрування $t_i \ll t_d$, або за рахунок збільшення тактової частоти зчитування f_d . Однак при цьому зменшується енергетична чутливість ОЕСС.

Із формули (2.50) знайдемо МПФ системи «об'єктив – ПВ» в залежності від кута візування θ_{vx} . Із розрахунків отримуємо: $k_{eff} = f'_o / D_p = 4,25$, $\lambda = 0,6 \text{ мкм}$, $\eta_{di} = 1$, $V_D = 7 \text{ мкм}$, $\theta_{vx} = 35^\circ$. На рис. 2.7 наведено графіки МПФ ОЕСС в надирі при куті візування $\theta_{vx} = 35^\circ$.

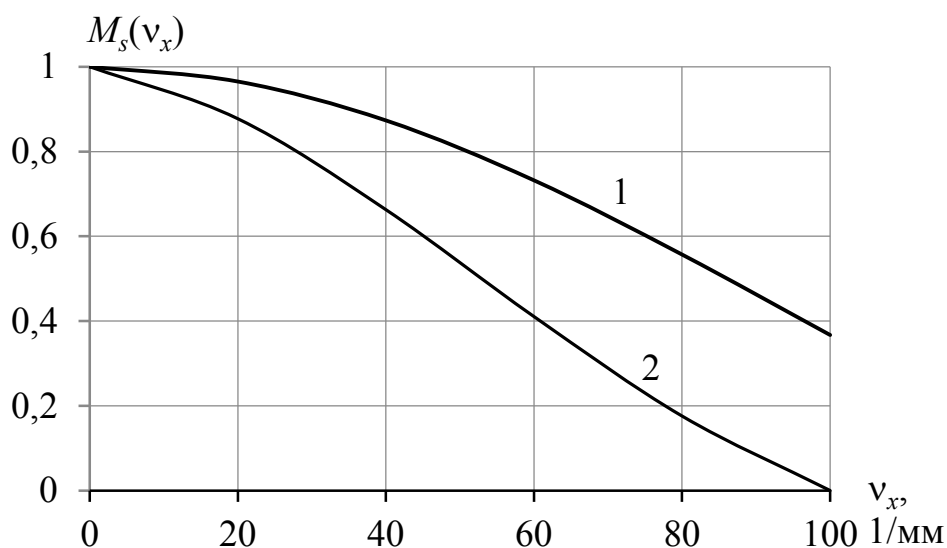


Рис. 2.7. МПФ ОЕСС при кутах візування: 1 – $\theta_{vx} = 0^\circ$; 2 – $\theta_{vx} = 35^\circ$

Видно, що на частоті Найквіста $v_N = 1/2V_D = 71 \text{ мм}^{-1}$ контраст зображення наближено становить 61% в надирі, а при куті візування $\theta_{vx} = 35^\circ$ – 29%, тобто якість зображення погіршується вдвічі.

2.1.4 Перетворення оптичного сигналу в електричний

Як було сказано раніше, в ОЕСС з комплексуванням інформації як правило використовують пасивні ТВ та ТПВ канали. ПВ є одним з найважливіших блоків ОЕСС. Існують кілька методів прийому оптичного випромінювання – прямий, гетеродинний, балансний, синхронний тощо. В ОЕСС зазвичай реалізується перший тип прийому, коли вхідне оптичне випромінювання перетворюється в електричний сигнал без домішування додаткових сигналів [2].

Без врахування втрат потужності при просторовій виборці та в електронних блоках, сигнал на виході ПВ дорівнює

$$u_s(t) = \int_{\Delta\lambda_s} \Phi(\lambda, x, y) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot R_D(\lambda) d\lambda, \quad (2.52)$$

де $\Phi(\lambda, x, y)$ - спектральний розподіл потоку випромінювання на вхідній зіниці, який визначається формулою (2.30); $R_D(\lambda)$ - спектральна чутливість ПВ.

Дискретний характер лінійних і матричних ПВ викликає появу геометричного шуму в зображенні та псевдочастот в просторово-частотному спектрі сигналу, що обумовлює необхідність модифікації традиційних загальноновживаних параметрів і характеристик ОЕСС [2].

2.1.4.1 Канали видимого діапазону спектру

В сучасних ОЕСС в якості ПВ використовуються твердотільні фотоперетворювачі на основі приладів з зарядовим зв'язком та комплементарних структур метал-оксид-напівпровідник (ПЗЗ, КМОН), що працюють як з накопиченням, так і без накопичення енергії. Чутливі елементи конструктивно розміщуються в лінійки або в матриці. Лінійні ПВ зазвичай розміщуються на космічних апаратах, де просторова розгортка зображення впоперек орієнтації лінійки здійснюється за рахунок руху носія.

За часом накопичення енергії пасивні ОЕСС розділяються на системи без накопичення енергії, з рядковим і кадровим накопиченням. Рядкове накопичення енергії використовується в системах з однорядковою розгорткою (так звані TDI-приймачі). Звичайні ТВ канали працюють в режимі, коли процеси експонування комутації відбуваються одночасно.

З огляду на те, що вихідна інформація ОЕСС сприймається оператором, доцільно також розглядати як два окремих класи моноблокові системи, в яких МПВ і матричний дисплей знаходяться в одному корпусі, і розподілені системи, в яких МПВ (в тому числі – кілька різнотипових) може знаходитись на значній відстані від монітора. Це може суттєво впливати на процес формування сигналу внаслідок однакових зовнішніх впливів на вхідний і вихідний блоки ОЕСС в першому випадку і різних – в другому.

Основними характеристиками ПЗЗ-лінійки, які будемо використовувати для моделювання ОЕСС [96] є: тактова частота зчитування f_d ; експозиція, еквівалентна середньому квадратичному значенню шуму H_n ; розмір пікселя $V_D \times W_D$; відстань між центрами пікселів Δl_D ; кількість пікселів N_D ; чутливість R_D .

Розглянемо геометричну схему для визначення радіометричного розділення ОЕСС, яка була приведена на рис. 2.5.

Нехай об'єкт спостереження має рівномірний за площею спектральний коефіцієнт відбиття $\rho_t(\lambda)$, а його кутові розміри значно перевищують миттєве поле зору ОЕСС. Об'єкт розташований поверхні Землі, яка має рівномірний спектральний коефіцієнт відбиття $\rho_b(\lambda)$. Об'єкт і фон відбивають світло за законом Бугера-Ламберта.

Із формул (2.8), (2.10) спектральну яскравість поверхні об'єкта і фону визначаємо як

$$L_t(\lambda) = \rho_t(\lambda) \frac{E_0(\lambda)}{\pi} \text{ та } L_b(\lambda) = \rho_b(\lambda) \frac{E_0(\lambda)}{\pi}, \quad (2.53)$$

де $E_0(\lambda)$ – спектральна освітленість поверхні Землі.

Якщо нормаль до поверхні об'єкту і оптична вісь ОЕСС утворюють кут θ_{vx} , то у вхідну зіницю об'єктива ОЕСС надходить спектральний потік випромінювання, який визначається формулою (2.27) з поправкою на кут нахилу θ_{vx} візирної вісі

$$\Phi_t(\lambda) = \tau_A(\lambda)L_t(\lambda)A_t\Omega_o \cos \theta_{vx}. \quad (2.54)$$

Інтегральна освітленість ПВ, яку створює об'єкт спостереження, буде визначатися як

$$E_t = \frac{1}{A_D} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_t(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda = \frac{A_t \Omega_o \cos \theta_{vx}}{A_D} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_t(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda, \quad (2.55)$$

де $A_D = V_D W_D$ – площа пікселя ПВ.

Для об'єктів великих розмірів площа A_t , яка формує потік випромінювання, що надходить на піксель ПВ, визначається проекцією цього пікселя на поверхню Землі. Ця площа дорівнює [105]

$$A_t = \frac{HV_D}{f'_o \cos^2 \theta_{vx}} \frac{W_D H}{f'_o \cos \theta_{vx}} = \left(\frac{H}{f'_o} \right)^2 \frac{A_D}{\cos^3 \theta_{vx}}. \quad (2.56)$$

З формули (2.56) видно, що зі збільшенням кута візування θ_{vx} зростає площа A_t , що призводить до погіршення просторового розділення ОЕСС. У той же час це повинно привести до зменшення радіометричного розділення.

Для дослідження цього висновку, розглянемо рис. 2.8, з якого знаходимо тілесний кут Ω_o :

$$\Omega_o = \frac{A_p}{R^2} = \frac{\pi D_p^2 \cos^2 \theta_{vx}}{4H^2}, \quad (2.57)$$

де D_p – діаметр вхідної зіниці об'єктиву.

Підставимо (2.53), (2.56) і (2.57) до (2.55):

$$E_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_t(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda = \left(\frac{H}{f'_o} \right)^2 \frac{A_D}{\cos^3 \theta_{vx}} \frac{\pi D_p^2 \cos^2 \theta_{vx}}{4H^2} \frac{\cos \theta_{vx}}{A_D} \times \\ \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) \rho_t(\lambda) \frac{E_0(\lambda)}{\pi} d\lambda = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f'_o} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) E_0(\lambda) \rho_t(\lambda) d\lambda. \quad (2.58)$$

Інтегральна освітленість ПВ, яку створює земна поверхня визначається аналогічним рівнянням

$$E_b = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) E_0(\lambda) \rho_b(\lambda) d\lambda. \quad (2.59)$$

ПВ реєструє різницю освітленості, створену об'єктом спостереження і поверхнею Землі, тобто

$$\Delta E = E_t - E_b = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o'} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) E_0(\lambda) [\rho_t(\lambda) - \rho_b(\lambda)] d\lambda. \quad (2.60)$$

Радіометричне розділення ОЕСС визначається мінімальним значенням відмінності ΔE_n , яке в свою чергу залежить від порогової експозиції ПВ H_n

$$\Delta E_n = \frac{H_n}{t_i}, \quad (2.61)$$

де t_i - час інтегрування (накопичення) ПВ.

Для інтегральних параметрів, які залежать від довжини хвилі λ , рівняння (2.60) набуває вигляду

$$\Delta E_n = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f_o'} \right)^2 \tau_A \tau_o E_0 \Delta \rho_n, \quad (2.62)$$

де $\Delta \rho_n = \rho_t - \rho_b$ - пороговий контраст коефіцієнта відбиття, або радіометричне розділення.

Із системи рівнянь (2.61) і (2.62) остаточно визначаємо радіометричне розділення

$$\Delta \rho_n = \frac{4H_n}{\tau_A \tau_o E_0 t_i} \left(\frac{f_o'}{D_p} \right)^2. \quad (2.63)$$

2.1.4.2 Канали ІЧ діапазону спектру

В загальній моделі перетворення інформації пасивні ТПВ канали ОЕСС принципово не відрізняються від видимих каналів. Суттєві відмінності виникають

на етапі формування сигналу ФЦО, як це показано в п.2.1.1. Спектральний діапазон (8 – 14) мкм, де функціонують більшість ТПВ каналів ОЕСС, має унікальні можливості для спостереження об'єктів самих різних типів. Це обумовлено тим, що на цей діапазон припадає більша частина теплової енергії, яку випромінюють об'єкти, що знаходяться на поверхні Землі, і сама поверхня, які мають температуру у діапазоні (250К – 310К); цей діапазон відповідає вікну прозорості земної атмосфери; аналіз теплової енергії дозволяє не тільки виявляти і локалізувати об'єкти на поверхні Землі, але і визначати їх поточний стан і режим функціонування.

Найважливішими характеристиками ПВ є спектральна чутливість $R_D(\lambda)$, частотна характеристика чутливості $R_D(f)$, шумовий спектр потужності $NPS(f)$, ефективна шумова смуга Δf , виявлювальна здатність D , D^* , освітленість E_n , яка є еквівалентною шуму, потужність NEP , яка є еквівалентною шуму, просторово-часова модуляційна передавальна функція M_D .

Перераховані характеристики визначаються відомими формулами [91]. Спектральна чутливість $R_D(\lambda)$ є функцією довжини хвилі і визначається головним чином матеріалом чутливого елемента ПВ. Частотна характеристика чутливості $R_D(f)$ є функцією чутливості від частоти модуляції f потоку випромінювання, який поступає на ПВ. Ця характеристика залежить від релаксаційної частоти f_D (частоти модуляції потоку випромінювання, при якій чутливість ПВ зменшується до 0,707 від максимуму) або відповідної постійної часу ПВ t_D :

$$f_D = \frac{1}{2\pi t_D}. \quad (2.64)$$

Нормоване значення спектральної щільності потужності шуму $G_n(f)=dP_n(f)/df$ є шумовим спектром потужності

$$NPS(f) = \frac{G_n(f)}{G_{n\max}}. \quad (2.65)$$

Ефективна шумова смуга Δf визначає частотну смугу підсилювача, ширина якої дозволяє повністю передати сигнал, і дорівнює

$$\Delta f = \frac{1}{G_{n\max}} \int_0^{\infty} G_n(f) M_{El}^2(f) df, \quad (2.66)$$

де $M_{El}(f)$ – МПФ підсилювача.

Освітленість, що є еквівалентною шуму E_n визначається при рівності кількості фотонів N_{ph} , які падають на чутливу площадку ПВ при рівномірній освітленості E_n за час накопичення сигналу t_i , кількості фотонів N_n , які формують шумовому складову сигналу ПВ u_n :

$$N_{ph} = E_n k_{oe} A_D t_i; \quad (2.67)$$

$$N_n = \frac{u_n}{k_{ue} \eta_D}, \quad (2.68)$$

де $k_{eo} = 10^{16}$ фотон/(лм·с) – перевідний коефіцієнт; k_{ue} – коефіцієнт перетворення ПВ, В/електрон; η_D – квантова ефективність чутливого елемента ПВ, електрон/фотон.

Остаточно із рівності $N_{ph} = N_n$ маємо

$$E_n = \frac{u_n}{k_{ue} \eta_D k_{oe} A_D t_i}. \quad (2.69)$$

Потужність, що є еквівалентною шуму NEP (також використовується поняття порогового потоку Φ_{emin}), визначається як величина потоку випромінювання, який створює на виході ПВ сигнал, що дорівнює середньоквадратичному значенню шуму u_n в заданій частотній смузі

$$NEP = \Phi_{emin} = \frac{u_n}{R_D}. \quad (2.70)$$

Виявлювальна здатність ПВ D характеризує шумові властивості ПВ і є величиною, оберненою до потужності, що еквівалентна шуму

$$D = \frac{1}{NEP}. \quad (2.71)$$

Для виключення впливу на розрахунки площі чутливої площадки ПВ A_D та шумової смуги Δf використовують поняття питомої виявлювальної здатності D^*

$$D^* = \frac{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}{NEP}. \quad (2.72)$$

МПФ ПВ традиційно описується добутком двох функцій: просторової МПФ M_{Ds} і часової МПФ M_{Dt} , як це описано формулою (2.36). В найпростішому випадку одномірна МПФ ПВ має вигляд

$$M_D(f) = \frac{\sin(\pi f t_o)}{\pi f t_o \sqrt{1 + (2\pi f t_o)^2}}. \quad (2.73)$$

Для врахування просторової вибірки сигналу в лінійних або матричних ПВ МПФ МПВ зазвичай подають у вигляді добутку двох функцій: МПФ $M_{Dsl}(v_x, v_y)$ чутливої площадки пікселя і МПФ $M_{Dsd}(v_x, v_y)$, що враховує процес просторової вибірки.

Функція $M_{Dsd}(v_x, v_y)$ визначається періодом вибірки. Якщо період вибірки матричної структури складає $V_D \times W_D$, то функція $M_{Dsd}(v_x, v_y)$ має вигляд:

$$M_{Dsd}(v_x, v_y) = V_D W_D \sin c(V_D v_x) \sin c(W_D v_y). \quad (2.74)$$

Принцип дії ПВ також впливає на МПФ. Цей вплив специфічний і може бути врахований у вигляді додаткових передавальних функцій, якщо це необхідно.

Розглянемо математичні моделі найбільш розповсюджених фотонних та теплових ПВ [2].

Спектральна чутливість фотонних ПВ має верхню граничну довжину хвилі λ_2 . Спектральні чутливість $R_D(\lambda)$ і питому виявлювальну здатність $D^*(\lambda)$ апроксимують емпіричними формулами

$$R_D(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda_2} R_{\max} & \text{при } \lambda \leq \lambda_2 \\ 0 & \text{при } \lambda > \lambda_2, \end{cases} \quad (2.75)$$

$$i \quad D^*(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{\lambda_2} D_{\max}^* & \text{при } \lambda \leq \lambda_2 \\ 0 & \text{при } \lambda > \lambda_2. \end{cases} \quad (2.76)$$

При роботі МПВ в режимі накопичення ТДІ з'являється додатковий фактор, який впливає на МПФ ПВ, яку визначено раніше формулою (2.36). Якщо середня швидкість руху зарядових пакетів v_e відрізняється від швидкості руху зображення v_i , то величина МПФ зменшується в M_{Dv} разів:

$$M_{Dv}(v_x) = \frac{\sin\left(\frac{\pi v_x N \Delta v}{2 v_N v_i}\right)}{\frac{\pi v_x N \Delta v}{2 v_N v_i}}, \quad (2.77)$$

де v_N – частота Найквіста.

Вольтову чутливість теплових ПВ можна визначити як

$$R_D = \frac{\alpha_a k_D}{G_{th} \sqrt{1 + (2\pi t_D f)^2}}, \quad (2.78)$$

де α_a – коефіцієнт поглинання матеріалу чутливого елемента; G_{th} – теплопровідність між чутливим елементом і оточуючим середовищем; k_D – коефіцієнт перетворення зміни температури чутливого елемента ΔT у зміну напруги Δu на виході ПВ $k_D = \Delta u / \Delta T$.

Постійна часу теплового ПВ визначається теплоємністю чутливого елемента C_{th}

$$t_D = \frac{C_{th}}{G_{th}}. \quad (2.79)$$

Коефіцієнт перетворення k_D для основних типів теплових ПВ визначається за формулами:

- для болометра при умові, що $R_{De} \ll R_i$:

$$k_D = \alpha_t R_{De} i_0, \quad (2.80)$$

де $\alpha_t = R_{De}^{-1} dR_{De} / dT$ – температурний коефіцієнт опору матеріалу чутливого елемента, з електричним опором R_{De} ; i_0 – струм зміщення, який протікає через болометр; R_1 – опір навантаження;

- для піроелектричного ПВ:

$$k_D = \frac{\gamma_p A_D 2\pi f R_D}{\sqrt{1 + (2\pi t_{De} f)^2}}, \quad (2.81)$$

де $\gamma_p = dp / dT$ – піроелектричний коефіцієнт матеріалу чутливого елемента; A_D – площа чутливого елемента; $t_{De} = R_D C_D$ – електрична постійна часу; C_D – електрична ємність чутливого елемента; p – дипольний момент матеріалу ПВ.

МПВ здійснює двовимірну просторову й одномірну часову вибірку відліків. Через те, що безперервний розподіл освітленості перетворюється в дискретний, сигнал розподілу зарядів ОЕСС з вибіркою виявляється просторово неінваріантним, тобто зображення точкового джерела залежить від його положення щодо двовимірної ґратки матриці. Однак при виконанні певних вимог, аналіз ОЕСС, заснований на теорії лінійної просторової фільтрації й використанні МПФ, може бути розповсюджений і на ОЕСС з вибіркою [9].

За час накопичення сигналу t_i в МПВ буде сформований сигнал $Q(x_i', y_j')$, пропорційний просторовому розподілу освітленості $E(x', y')$

$$Q(x_i', y_j') = k \int_{x_i' - \frac{V_D}{2}}^{x_i' + \frac{V_D}{2}} \int_{y_j' - \frac{W_D}{2}}^{y_j' + \frac{W_D}{2}} E(x', y') dx' dy', \quad (2.82)$$

де x_i', y_j' – координати центра пікселя МПВ i -го стовпця і j -го рядка відповідно; $V_D \times W_D$ – розмір пікселя; k – коефіцієнт пропорційності, який при фіксованому часі накопичення t_i і заданому спектральному складі оптичного випромінювання можна розглядати як інтегральну чутливість МПВ.

Якщо представити МПВ транспорантом у вигляді матриці прямокутних пікселів розмірами $X' \times Y'$ з відстанями між їхніми центрами $d_{x'}$ і $d_{y'}$, то функція пропускання кожного пікселя з координатами центру x'_D і y'_D має вигляд

$$M_D(x', y', x'_D, y'_D) = \text{rect}\left(\frac{x' - x'_D}{X'}, \frac{y' - y'_D}{Y'}\right). \quad (2.83)$$

У результаті вибірки сигналу $E(x', y')$ зображення на МПВ має вигляд просторово фільтрованої вибіркової сукупності середніх значень опромінення в межах кожного пікселя. Можлива матрична структура сигналу об'єкта на просторових частотах, близьких до частоти вибірки суттєво спотворюється з утворенням видимого сигналу проміжної частоти [106]. Потім у кожному пікселі здійснюється перетворення оптичного випромінювання в електричний сигнал і формування зарядів. Заряд $q(0,0)$, що був сформований центральним вікном ($x'_D = 0, y'_D = 0$), у випадку фотонних ПВ визначається як

$$q(0,0) = \frac{\eta(\lambda) \cdot \bar{e} t_H}{h\nu} \iint_{-\infty}^{\infty} E(x', y') \text{rect}\left(\frac{x'}{a_x}; \frac{y'}{a_y}\right) dx' dy', \quad (2.84)$$

де $\eta(\lambda)$ – квантова ефективність чутливого шару на робочій довжині хвилі; h – постійная Планка; ν – частота випромінювання; \bar{e} – заряд електрона; t – час накопичення заряду.

Просторову вибірку можна виразити через дельта-функцію $\delta(x', y')$ в точці $x' = 0, y' = 0$. Тоді значення заряду (в розмірності поверхневої густини заряду) дорівнює

$$q(0,0) = \left[\frac{\eta(\lambda) \cdot \bar{e} t}{h\nu} \iint_{-\infty}^{\infty} E(x', y') \text{rect}\left(\frac{x'}{a_x}; \frac{y'}{a_y}\right) dx' dy' \right] \delta(x', y'). \quad (2.85)$$

Після заміни змінних і з урахуванням властивостей функції rect вираз (2.85) запишеться у вигляді

$$q(0,0) = \left[\frac{\eta(\lambda) \cdot \bar{e} t}{h\nu} \iint_{-\infty}^{\infty} E(u, v) \text{rect}\left(\frac{x' - u}{X'}; \frac{y' - v}{Y'}\right) du dv \right] \delta(x', y'). \quad (2.86)$$

Отже, вибіркоче значення заряду в точці $x' = 0, y' = 0$ з точністю до постійного множника дорівнює згортці функцій $E(x', y')$ і $\text{rect}\left(\frac{x'}{X'}; \frac{y'}{Y'}\right)$, помножених на дельта-функцію $\delta(x', y')$:

$$q(0,0) = \frac{\eta(\lambda) \cdot \bar{e}t}{hv} \left[E(x', y') \otimes \text{rect}\left(\frac{x'}{X'}; \frac{y'}{Y'}\right) \right] \delta(x', y'). \quad (2.87)$$

Аналогічно знаходиться вибіркове значення заряду в точці x'_D, y'_D з координатами $x'_D = md_x$; $y'_D = nd_y$, де m, n - кількість пікселів в рядку і стовпці відповідно. В результаті заряд МПВ $q(x', y')$ визначиться як сума вибіркових значень в кожній точці md_x, nd_y :

$$q(x', y') = \sum_{m,n=-\infty}^{m,n=\infty} \frac{\eta(\lambda) \cdot \bar{e}t}{hv} \times \times \iint \left\{ E(u, v) \text{rect}\left[\frac{(u - md_{x'} - x')}{X'}, \frac{(v - nd_{y'} - y')}{Y'}\right] dx' dy' \right\} \times \times \delta(x' - md_{x'}, y' - nd_{y'}). \quad (2.88)$$

З урахуванням того, що прямокутна функція є дійсною та парною, запишемо (2.88) аналогічно (2.87)

$$q(x', y') = \frac{\eta(\lambda) \cdot \bar{e}t}{hv} \left[E(x', y') \otimes \text{rect}\left(\frac{x'}{X'}; \frac{y'}{Y'}\right) \right] \times \frac{1}{d_{x'} d_{y'}} \text{comb}\left(\frac{x'}{d_{x'}}; \frac{y'}{d_{y'}}\right), \quad (2.89)$$

$$\text{де } \sum_{m,n=-\infty}^{m,n=\infty} [\delta(x' - md_{x'}, y' - nd_{y'})] = \frac{1}{d_{x'} d_{y'}} \text{comb}\left(\frac{x'}{d_{x'}}; \frac{y'}{d_{y'}}\right).$$

Таким чином, вибірка МПВ з точністю до постійного множника є еквівалентною згортці функцій освітленості в зображенні об'єкта з розподілом чутливості по пікселю й наступній вибірці в центрі кожного елемента. Якщо розподіл чутливості по пікселю є нерівномірним і описується функцією $M_D(x', y')$, то вибіркова функція $q(x', y')$ має вид

$$q(x', y') = \frac{\eta(\lambda) \cdot \bar{e}t}{hv} [E(x', y') \otimes M_D(x', y')] \times \frac{1}{d_{x'} d_{y'}} \text{comb}\left(\frac{x'}{d_{x'}}; \frac{y'}{d_{y'}}\right), \quad (2.90)$$

МПВ має кінцеві розміри, тому (2.90) можна переписати як

$$q(x', y') = \frac{\eta(\lambda) \cdot \bar{e}t}{hv} \left[E(x', y') \otimes \text{rect}\left(\frac{x'}{X'}; \frac{y'}{Y'}\right) \right] \times \times \text{comb}\left(\frac{x'}{d_{x'}}; \frac{y'}{d_{y'}}\right) \text{rect}\left(\frac{x'}{l_x}; \frac{y'}{l_y}\right). \quad (2.91)$$

2.1.5 Обробка електричного сигналу в інформаційних каналах

Зазвичай блоки електроніки і ТВ, і ТПВ каналів вважають лінійною системою з МПФ $M_{El}(f)$, яку можна визначити як [91]

$$M_{El}(f) = \frac{C_{El}(f)}{C_{El}^{max}}, \quad (2.92)$$

де $C_{El}(f)$ – коефіцієнт підсилення електронного тракту на частоті f , C_{El}^{max} – максимальне значення коефіцієнта підсилення.

В блоці електроніки при подальшому проходженні сигналу і шуму вони квантуються по амплітуді та дискретизуються у часі. Частіше за все при розрахунках основних характеристик ОЕСС не враховується вплив часової дискретизації і операції поновлення аналогового сигналу, яку здійснює цифро-аналоговий перетворювач, на спектральну щільність потужності шуму.

Попередній підсилювач є низькочастотним фільтром і здійснює часову фільтрацію вхідного сигналу [107]. Смуга пропускання такого фільтра знаходиться у межах від 0 до деякої максимальної частоти (частоти зрізу) f_{max} , за межами якої фільтр не пропускає сигнал. МПФ цього фільтра має вигляд:

$$M_{ilf}(f) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } 0 \leq f \leq f_{max}; \\ 0, & \text{якщо } f > f_{max}. \end{cases} \quad (2.93)$$

Якщо максимальна просторова частота є обмеженою частотою Найквіста $\nu_N = 1/2 V_D$, то максимальну частоту відеосигналу можна визначити як

$$f_{max} = \frac{1}{2t_o}. \quad (2.94)$$

Ідеальний низькочастотний фільтр пропускає обмежений спектр корисного сигналу без спотворень і подавляє шум за межами смуги пропускання, але МПФ реального низькочастотного фільтра істотно відрізняється від ідеального. Найбільше розповсюдження отримали низькочастотні фільтри Баттерворда, які забезпечують пласку характеристику у смузі пропускання. МПФ такого фільтра

описується формулою

$$M_{rlf}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_{3dB}} \right)^{2n} \right]^{-0,5}, \quad (2.95)$$

де f_{3dB} – частота, на якій амплітуда вихідного сигналу зменшується на 3 dB або в $\sqrt{2}$ разів; n – порядок фільтра.

Наступною ланкою електронного фільтра є цифро-аналоговий перетворювач. Його МПФ залежить від частоти дискретизації і для кутових просторових частот в найпростішому випадку апроксимується функцією

$$M_{dm}(\nu_x) = \text{sinc}\left(\frac{\nu_x}{\nu_d}\right), \quad (2.96)$$

де ν_d – кутова просторова частота дискретизації.

Після цифро-аналогового перетворювання сигнал має ступінчасту форму і для його поновлення використовується низькочастотний фільтр, який придушує бокові спектральні складові, що виникають в результаті усереднення часової вибірки і згладжування форми сигналу. В результаті сигнал може зміститись відносно вхідного по часовій вісі.

МПФ ідеального фільтра дорівнює одиниці на усіх частотах від 0 до частоти Найквіста. Результируюча реальна МПФ блоку електроніки за умови, що період МПФ дорівнює розміру пікселя $\nu_d = 1/\alpha_D$, в кутових просторових частотах матиме вигляд

$$M_{El}(\nu_x) = \text{sinc}(\alpha_D \nu_x) \frac{1}{1 + (2\alpha_D \nu_x)^{2n}}. \quad (2.97)$$

В тих випадках, коли гранична частота у спектрі сигналу не перевищує частоту Найквіста, вважають, що $M_{El}(\nu_x) \approx 1$.

Для відновлення неспотвореного вихідного зображення по сукупності переданих відліків відеосигналу, сформованих при зчитуванні зарядових пакетів і слідує з інтервалами дискретизації d_x , у поздовжньому й d_y , у поперечному напрямках, відповідно до теореми відліків необхідно виконувати дві умови. По-

перше, спектр переданих частот $\tilde{E}_M(v_{x'}, v_{y'})$ уздовж осей дискретизації слід обмежити частотами

$$v_{x'} \leq \frac{1}{2} v_{sx'} = \frac{1}{2} \frac{1}{d_{x'}}; \quad v_{y'} \leq \frac{1}{2} v_{sy'} = \frac{1}{2} \frac{1}{d_{y'}}, \quad (2.98)$$

де $v_{sx'}$, $v_{sy'}$ - частоти дискретизації по двом осям.

Тому що значення $0,5v_{sx'}$ і $0,5v_{sy'}$ відповідають частотам Найквіста $v_{x'N}$, $v_{y'N}$, можна записати

$$v_{x'} \leq v_{x'N}; \quad v_{y'} \leq v_{y'N}. \quad (2.99)$$

По-друге, вихідний сигнал необхідно пропустити через ідеальний двовимірний фільтр низьких частот із частотами зрізу $v_{x'N}$, $v_{y'N}$ і імпульсною характеристикою виду

$$S(x', y') = \text{sinc} \left(\frac{x'}{d_{x'}}; \frac{y'}{d_{y'}} \right). \quad (2.100)$$

У випадку невиконання умови теореми відліків просторові частоти в спектрі зображення перевищують частоти Найквіста і виникає накладення компонентів частот побічних спектрів дискретизації на компоненти основного спектра [92]. Транспонування компонентів побічних спектрів в область частот основного спектра викликає появу псевдо частот і проявляється у вигляді сторонніх візерунків (муарів) на зображенні. Якщо ж вхідний сигнал має фінітний спектр, максимальна частота якого $v_{max} \leq v_N$, то низькочастотний фільтр виду (2.91), смуга якого $\Delta v = v_{max}$, дозволить повністю усунути нелінійні викривлення й відновити сигнал без втрат. Для цього випадку просторовий спектр вихідного сигналу має вигляд

$$\begin{aligned} \tilde{q}_s(v_{x'}, v_{y'}) &= \tilde{q}(v_{x'}, v_{y'}) \tilde{H}_f(v_{x'}, v_{y'}) = \\ &= \tilde{q}(v_{x'}, v_{y'}) \text{rect} \left(\frac{v_{x'}}{2v_{x'max}}; \frac{v_{y'}}{2v_{y'max}} \right). \end{aligned} \quad (2.101)$$

Амплітудне квантування можна врахувати зміною середньоквадратичного значення шуму на поправку Шеппарда [108]

$$k_{nl} = \sqrt{1 + \frac{u_{d0}^2}{12u_n^2}}, \quad (2.102)$$

де u_{d0}/u_n – відношення кроку квантування аналого-цифрового перетворювача до середньо квадратичного значення шуму на його вході.

Спектр потужності шуму на виході цифро-аналогового перетворювача можна розрахувати, наприклад, як [109]

$$G_2(f) = \left[\frac{\sin(\pi_d f)}{\pi_d f} \right]^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} G_1\left(f + \frac{n}{t_d}\right), \quad (2.103)$$

де t_d – інтервал дискретизації; $G_1(f)$ – спектр потужності шуму до дискретизації.

В сучасних ОЕСС зазвичай відбувається підвищення відношення сигнал/шум за рахунок цифрової фільтрації сигналу [110]. Але це питання не доцільно розглядати в рамках вирішуваних в даній роботі задач. На певному етапі перетворень сигналів в електронних блоках окремих інформаційних каналів відбувається комплексування інформації в каналах, що розглядається в розділі 2.2.

2.1.6 Формування зображення в полі зору оператора

Зображення ФЦО в поле зору оператора може виводитись у кілька способів: бінокулярно/монокулярно, з застосуванням додаткових оптичних систем або без них. Найчастіше зображення формується на екрані монітора й розглядається оператором безпосередньо з екрана або через коліматор. В авіаційних прицілах, автомобільних проекційних моніторах, ОЕСС, що встановлюються на стрілецькому озброєнні, зазвичай ФЦО розглядається оператором через телескопічний або колімаційний візор. В останньому випадку сигнал ФЦО не перетворюється в системі, а коліматор використовується для введення додаткової службової інформації. Отже з кількох згаданих варіантів формування зображень в полі зору оператора в рамках математичної моделі доцільно розглядати тільки екранний монітор. Серед десятків типів моніторів в ОЕСС використовуються рідкокристалічні, світлодіодні та катодолюмінісцентні монітори. Рідкокристалічні

монітори є пасивними, а інші два типи – активними. Рідкокристалічні та світлодіодні монітори мають матричні структури, а в електроннопроменевих трубках використовується послідовне сканування електронним променем. У всіх випадках монітори вважають лінійними ланками, як можна описувати з допомогою МПФ.

В МПФ матричних моніторів зазвичай враховується тільки просторова складова, яка при ортогональному розташуванні пікселів розміром $v_s \times w_s$ має вигляд

$$M_s(v_x, v_y) = \frac{\sin(\pi v_s v_x)}{\pi v_s v_x} \frac{\sin(\pi w_s v_y)}{\pi w_s v_y}. \quad (2.104)$$

Для математичного моделювання пристроїв виводу зображень на перших етапах проектування використовують значення середньої яскравості екрана, його кутовий розмір, контраст зображення, МПФ [92].

Статичний контраст зображення визначається як

$$C_{v1} = \frac{L_{v\max} - L_{v\min}}{L_{v\min}}, \quad (2.105)$$

або частіше аналогічно (2.3) як

$$C_{v2} = \frac{L_{v\max} - L_{v\min}}{L_{v\max} + L_{v\min}}, \quad (2.106)$$

де $L_{v\max}$ – максимальна яскравість екрана; $L_{v\min}$ – яскравість екрана вимкненого монітора.

Зображення об'єкта на екрані монітора має розміри

$$V_t'' \times W_t'' = (V_t' \times W_t') \cdot \beta_{El}^2, \quad (2.107)$$

де $V_t'' \times W_t''$ – розміри зображення об'єкта, сформованого об'єктивом в площині ПВ; $\beta_{El} = L_{Sv} / L_{Dv}$ – електронне збільшення, де L_{Sv} – висота растра екрана монітора; L_{Dv} – висота лінійного поля зору ОС в площині ПВ.

Кутовий розмір зображення об'єкта на екрані монітора залежить від відстані між екраном і оком спостерігача R_{SE}

$$\xi''_{tx} \times \xi''_{ty} = \frac{V''_t}{R_{SE}} \times \frac{W''_t}{R_{SE}}. \quad (2.108)$$

Якщо оператор спостерігає зображення на екрані монітора через колімаційну систему, наприклад, окуляр, коліматорний візир, то кутовий розмір зображення визначається як

$$\xi''_{tx} \times \xi''_{ty} = \frac{V''_t}{f'_e} \times \frac{W''_t}{f'_e}, \quad (2.109)$$

де f'_e – задня фокусна відстань окуляра.

Зв'язок між лінійними v_{xl} та кутовими v_{xa} просторовими частотами у просторі об'єкта і відповідними просторовими частотами v''_{xl} і v''_{xa} у просторі спостереження визначається через відповідні поперечні розміри об'єкта V_{tp} і зображень V'_{tp} , V''_{tp} наступним чином

$$v_{xl} = \frac{1}{V_{tp}}; \quad v_{xa} = \frac{R}{V_{tp}} - \text{у просторі об'єкта};$$

$$v'_{xl} = \frac{1}{V'_{tp}} = \frac{1}{V_{tp}} \frac{R}{f'_o} = v_{xl} \frac{R}{f'_o}; \quad v'_{xa} = \frac{f'_o}{V'_{tp}} = \frac{R}{V_{tp}} = v_{xa} - \text{в площині ПВ};$$

$$v''_{xl} = \frac{1}{V''_{tp}} = \frac{1}{V'_{tp} \beta_{El}} = \frac{v'_{xl}}{\beta_{El}} = v_{xl} \frac{R}{f'_o \beta_{El}}; \quad v''_{xa} = \frac{R_{SE}}{V''_{tp}} = \frac{R_{SE}}{V'_{tp} \beta_{El}} = v_{xa} \frac{R_{SE}}{f'_o \beta_{El}} - \text{в просторі}$$

монітора.

Кутове збільшення ОЕСС визначається як відношення кутових розмірів зображення α''_{tp} та об'єкта α_{tp}

$$\Gamma_s = \frac{tg \alpha''_{tp}}{tg \alpha_{tp}} \approx \frac{\alpha''_{tp}}{\alpha_{tp}} = \frac{V''_{tp}}{R_{SE}} \frac{R}{V_{tp}} = \frac{V''_{tp}}{R_{SE}} \frac{f'_o}{V'_{tp}} = \frac{f'_o \beta_{El}}{R_{SE}}. \quad (2.110)$$

$$\text{Тоді } v''_{xa} = v_{xa} / \Gamma_s.$$

Значний вплив на якість інтерпретації зображення в ОЕСС відіграє дискретизація зображень в результаті просторової вибірки як на МПВ, так і на матричному моніторі. В зображенні, яке було сформовано з використанням вибірки, виникають спектральні компоненти, обумовлені псевдочастотами, які

відсутні в спектрі вхідного сигналу. Отриманий спектр, крім базового, основного спектру зображення об'єкта, не спотвореного вибіркою, містить високочастотні компоненти, що відповідають псевдочастотам, які відсутні в спектрі оригінального сигналу. Візуально ці компоненти проявляються у вигляді помітної для оператора дискретної, зокрема рядкової, структури зображення, що суттєво ускладнює його дешифрування [9, 92].

Експериментальні дослідження свідчать, що візуальне дешифрування зображення з вибіркою за інших рівних умов є еквівалентним дешифруванню зображення без вибірки, але отриманого за допомогою ОЕСС, що має в ξ разів гірше кутове розділення. Коефіцієнт ξ визначається відносною часткою псевдочастот у спектрі зображення точкового об'єкта [111].

2.2 Комплексування спектральних каналів

Алгоритмам комплексування зображень присвячено велику кількість досліджень, як про це сказано в п. 1.4. Але на відміну від розглянутих вище фізико-математичних моделей, ці алгоритми оперують на рівні математичних описів зображень, які не враховують природу сигналів. Така ситуація склалась частково тому, що основними фахівцями з комплексування є програмісти та математики, а частково в результаті величезного розмаїття можливих методів об'єднання інформації. Комплексування зображень є суттєво нелінійним процесом. Тому безпосередньо ввести цей процес в модель лінійної системи неможливо. Також не можна сподіватись на розроблення універсальної моделі комплексування сигналів навіть в найпростішому - двоканальному варіанті з огляду на значну варіативність методів і точок їх застосування в ланцюзі перетворення інформації (див. п.1.4).

Наразі питання моделювання перетворення інформації в ОЕСС з комплексуванням є невирішеним в частині опису механізмів об'єднання зображень.

Можливий спосіб вирішення цієї проблеми полягає у заміні механізму аналітичного обрахування певного параметру сигналу на виході блоку

комплексування механізмом чисельного визначення показника ефективності функціонування ОЕСС при заданих умовах спостереження та поточному методі комплексування. Це питання докладніше розглянуто в третьому та шостому розділах.

2.3 Особливості зорового сприйняття зображень, отриманих в ОЕСС з комплексуванням

Оператор ОЕСС аналізує зображення і приймає рішення виходячи з контексту поточної задачі та апріорної інформації про ФЦО [2]. Робота оператора узагальнено описується в рамках кількох послідовних механізмів - від пошуку об'єкта до його ідентифікації. З метою підвищення ефективності роботи системи «ОЕСС – оператор» на кожному етапі виконання поточної задачі комплексоване зображення в полі зору оператора має бути таким, щоб в ньому містилась тільки інформація, яка є необхідною для прийняття правильного рішення саме в цей час [112, 113].

Важливим є визначення категорії «поточна задача» для оператора ОЕСС. Справа в тому, що трактування цього терміну розробниками приладів і психологами різне. Відомі критерії Джонсона [9], запропоновані ще в 1958 році, оперують поняттями виявлення, встановлення орієнтації, розпізнавання, ідентифікації. Лабораторія нічного бачення (NVL) розробила модель [114], в якій встановлення орієнтації і розпізнавання замінені відповідно попереднім та кінцевим розпізнаванням. Критерії NIIRS [115] задають 10-бальну шкалу ступенів зорового сприйняття зображень для оцінки якості ОЕСС. З іншого боку, сучасна психологія при описі зорового сприйняття оперує поняттям «перцептивні дії» [116], які розділяються на пошукові та розпізнавальні.

Механізми візуального пошуку об'єктів досліджуються багато років і на сучасному етапі описуються досить адекватними моделями. В спрощеному вигляді більшість моделей враховують дві стадії пошуку – попередню, на якій зорова система автоматично фіксується на визначеній ділянці поля зору, і кінцеву, на якій відбувається цілеспрямований аналіз виділеної ділянки поля зору з участю

еталонних образів, що знаходяться в пам'яті оператора [117]. Найтиповішими варіантами виконання пошукової задачі, які розглядаються психофізиками і психологами, є: пошук малого об'єкта на рівномірному фоні, пошук великого (площинного) об'єкта на рівномірному фоні, пошук малого або великого об'єкта на нерівномірному (структурованому) фоні. Крім того окремо задаються умови пошуку - рухомість або нерухомість об'єкта [118], наявність апіорної інформації про присутність об'єкта в полі зору.

В найпростішому випадку зорового пошуку на рівномірному фоні час пошуку не залежить від форми об'єкта, а визначається його площею [119]. Пошук малих об'єктів (видимий кутовий розмір до $7'$) простої форми на рівномірному фоні з допомогою ОЕП телевізійного типу досліджувався в [120]. Показано, що ймовірність правильного виявлення залежить від контрасту та кількості рядків телевізійного растру в зображенні об'єкта. Наведені також результати щодо оцінки впливу контрасту, поля зору, просторового розділення (в кількості рядків телевізійного растру) і складності фону на час виявлення. Встановлено, що найбільший вплив на час виявлення мають складності фону і кількість строк телевізійного растру в зображенні. У роботі [120] вказані вище релевантні ознаки були доповнені відношенням сигнал/шум, який сприймається зоровою системою оператора (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Залежність порогових характеристик телевізійного зображення від поточної задачі

Поточна задача	Тип фону	Кількість рядків телевізійного растру в зображенні об'єкта	Граничне відношення сигнал/шум для різної кількості строк телевізійного растру на екрані			
			100	300	500	700
Виявлення	Рівномірний	1	2,8	2,8	2,8	2,8
	Нерівномірний	2	4,8	2,9	2,5	2,5
Розпізнавання	Рівномірний	8	4,8	2,9	2,3	2,5
	Нерівномірний	8	6,4	3,9	3,4	3,4
Ідентифікація	Рівномірний	13	5,8	3,6	3,0	3,0

Значний вплив на ефективність зорового пошуку відіграють кольори на зображенні. Людина краще сприймає зміни в кольорі, ніж в яскравості, розмірі, формі [121].

Аналіз впливу умов спостереження на ймовірності виявлення об'єкта показує [122], що головними факторами є досвідченість оператора, наявність апріорної інформації про об'єкт, стан світлової адаптації зорової системи оператора, кутовий розмір поля зору, час, що відведений на виконання задачі.

Психофізіологічні аспекти зорового розпізнавання на сьогодні вивчені значно гірше, ніж пошуку та виявлення об'єкта. Основними напрямками досліджень в цій галузі є визначення релевантних ознак зображень об'єктів на рівномірних фонах та встановлення закономірностей розпізнавання об'єктів на нерівномірних фонах. Дослідження впливу фону та просторового розділення в зображенні об'єкта на ймовірність його розпізнавання показує, що, збільшення кількості строк в зображенні об'єкта від 5 до 10 супроводжується підвищенням ймовірності розпізнавання. Подальше збільшення просторового розділення не призводить до помітного впливу на розпізнавання. Кількість строк в зображенні об'єкта в сенсі зорового сприйняття пов'язана з контрастом та кількістю рівнів сірого. Експерименти з розпізнавання об'єктів складної форми показують, що при зміні контрасту в межах від 0,2 до 0,6 при всіх значеннях просторового розділення відбувається значне підвищення ймовірності розпізнавання, але 100% розпізнавання відбувається тільки при 40 рядках в розмірі зображення об'єкта. В той же час, в зображеннях з невеликим просторовим розділенням кількість градацій сірого практично не впливає на розпізнавання. Цей вплив посилюється зі збільшенням кількості рядків починаючи з 12.

Найважливішою ознакою монохромного зображення при розпізнаванні є форма. Зважаючи на складність задачі, як правило, досліджується візуальне сприйняття різних типів об'єктів (як простих геометричних фігур, так і реальних зображень) на одному фоні, або одного об'єкта в різних ракурсах. Наприклад, в [123] показано, що для 50% розпізнавання квадрата просторове розділення в його зображенні може бути вдвічі меншим, ніж для шестикутника, але на 60% більшим,

ніж для трикутника. Нажаль, поняття форми на сьогодні не має усталеного формального опису [124]. Багато дослідників пропонують різні рішення цієї проблеми, але серед них є й загальновизнані факти. Одним з найважливіших є залежність інформативності форми від характеристик контурів [125]. Окрім складності форми на ефективність розпізнавання впливає також рухомість об'єкта, наприклад, при збільшенні кутової швидкості зображення в полі зору від 0 кут.град/с до 14 кут.град/с час розпізнавання форми збільшується в (1,5 – 4) рази [126].

Тобто очевидним є те, що релевантні ознаки можна розділити на часткові й узагальнені подібно до показників якості зображень. До певної міри значимі ознаки можна ототожнити з суб'єктивними показниками якості зображень і використовувати для їх визначення відповідні методики розрахунків.

Враховуючи фізичні механізми формування оптичного сигналу в різних діапазонах спектру і склад сучасних ОЕСС, доцільно розглядати два типи ОЕП – видимого діапазону спектру (телевізійні та низькорівневі) та інфрачервоні. В першому випадку релевантні ознаки зображень, як правило, є відображенням зовнішніх формоутворюючих ознак об'єкта; в другому – відображенням суміші формоутворюючих ознак об'єкта, об'ємного температурного розподілу та специфічних демаскуючих ознак (наприклад, факел реактивного двигуна). Крім того, важливими є просторово-частотні характеристики фону та взаємне переміщення об'єкта і фону [92].

Досить популярна та зручна для обчислень багатоканальна модель зорової системи людини [127, 128] базується на гіпотезі, що в зоровій системі здійснюється оптимальний прийом і подальший аналіз не всього образу об'єкту спостереження, а окремих гармонійних складових просторового спектру образу цього об'єкта.

Сигнал від об'єкту є обмеженим в просторі в деякій області прямокутної форми з розмірами $l_x \times l_y$

$$\Delta L_{\lambda}(\lambda, x, y) = \Delta L(\lambda) \cdot \bar{L}_l(x, y) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}\right), \quad (2.111)$$

де $\Delta L_\lambda(y)$ - функція, що описує спектральний контраст яскравості відносно фону;
 $\bar{L}_t(x, y)$ - нормована функція, що описує просторовий розподіл яскравості
 випромінювання по поверхні об'єкту.

Розподіл яскравості суміші сигналу й шуму на екрані монітора, може бути
 подано у вигляді [129]:

$$L'_s(x, y, t) = L_s(x, y, t) + L_n(x, y, t), \quad (2.112)$$

де $L_s(x, y, t)$ - розподіл яскравості у вихідному зображенні з урахуванням
 лінійних спотворень, які вносить електронний тракт ОЕСС; $L_n(x, y, t)$ -
 розподіл яскравості адитивного шуму у вихідному зображенні.

Сигнальну складову кореляційного інтегралу для m -ої гармоніки сигналу, що
 не змінюється в часі, приблизно можна розрахувати застосувавши теорему
 Парсеваля:

$$\begin{aligned} S_{mn} &\approx \frac{2k_B \Delta L_M}{A_t^2} \left| \tilde{L}_{st} \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \text{rect} \left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y} \right) \cos \left[2\pi \left(\frac{xm}{l_x} + \frac{yn}{l_y} \right) \right] \right\}^2 dx dy = \\ &= 2k_B \Delta L_M \left| \tilde{L}_{st} \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2 \left[\pi l_x \left(v_x - \frac{m}{l_x} \right) \right] \cdot \text{sinc}^2 \left[\pi l_y \left(v_y - \frac{n}{l_y} \right) \right] dv_x dv_y \end{aligned} \quad (2.113)$$

де $\tilde{L}_{st}(v_x, v_y) = \tilde{L}_t(v_x, v_y) M_S(v_x, v_y)$, причому $M_S(v_x, v_y)$ - МПФ ОЕСС, яка
 визначається формулою (2.1); V_x - лінійна швидкість сканування візирної осі
 приладу в напрямку x ; $\tilde{L}_t(v_x, v_y)$ - Фур'є-спектр яскравості об'єкту без
 урахування лінійних спотворень, які вносить ОЕСС; $A_t = l_x l_y$ - габаритна площа
 зображення об'єкта на екрані монітора; $\Delta L_M = \max \{ \Delta L_\lambda(\lambda) \}$ - максимальна
 яскравість зображення на екрані монітора; ε - коефіцієнт випромінювання об'єкту;

$L_\lambda^0(\lambda, T)$ - яскравість об'єкту як АЧТ; $k_B = \frac{A_M S_M}{T_y T_k V_x}$ - енергетичний коефіцієнт, який

визначається заданим способом розгортки зображення на екрані монітора, причому
 A_M - ефективна площа плями розсіяння (пікселя) на екрані монітора; S_M - коефіцієнт

передачі яскравості свічення екрану монітора при лінійній характеристиці; T_y - міжрядкова відстань; T_k - період кадру.

Вираз для ненульової гармоніки сигнальної складової кореляційного інтеграла можна представити у вигляді співвідношення

$$S_{mn} = \frac{2k_B \Delta L_M}{A_o} \left| \tilde{L}_{st} \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right|. \quad (2.114)$$

Розрахункове співвідношення для дисперсії шумової складової σ_{mn}^2 кореляційного інтеграла, яка дорівнює потужності адитивного шуму на виході mn -ого фільтру, може бути подано у вигляді

$$\begin{aligned} \sigma_{mn}^2 &= K'_n(0,0,0) = M \left\{ \left| L_n(x,y,t) \otimes M_{mn}(x,y) \otimes M_E(t) \right|^2 \right\} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{R}_{Mn}(v_x, v_y, v) \left| \tilde{M}_{mn}(v_x, v_y) \right|^2 \left| \tilde{M}_E(v) \right|^2 dv_x dv_y dv, \end{aligned} \quad (2.115)$$

де $\tilde{R}_{Mn}(v_x, v_y, v)$ - спектральна щільність потужності адитивного шуму в зображенні на екрані монітора.

Величина $\tilde{R}_{Mn}(v_x, v_y, v)$ може бути визначена як [129]:

$$\tilde{R}_{Mn}(v_x, v_y, v) = k_B^2 \left| \tilde{M}_M(v_x, v_y) \right|^2 \frac{\sigma_n^2}{v_k v_{yt}} \left| \tilde{M}_{el}(v_x V_x) \right|^2 \tilde{\rho}_n(v_x), \quad (2.116)$$

де σ_n^2 - дисперсія шуму кожного з чутливих елементів МПВ; $v_{yt} = 1/T_y$ - частота дискретизації зображення; $\tilde{\rho}_n(v_x)$ - спектр потужності просторового шуму, що формується при розгортці із швидкістю V_x шуму, який має спектр потужності $\tilde{\rho}_{nx}(v_x)$.

Підставивши (2.116) в (2.115), отримаємо вираз для дисперсії адитивного шуму на виході mn -ого фільтру:

$$\begin{aligned} \sigma_{mn}^2 &= \frac{k_B^2 \sigma_n^2}{2\tau_E v_k v_{y0}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\rho}_n(v_x) \left| \tilde{M}_{el}(v_x V_x) \right|^2 \left| \tilde{M}_M(v_x v_y) \right|^2 \times \\ &\times \text{sinc}^2 \left[\pi l_x \left(v_x - \frac{m}{l_x} \right) \right] \text{sinc}^2 \left[\pi l_y \left(v_y - \frac{n}{l_y} \right) \right] dv_x dv_y. \end{aligned} \quad (2.117)$$

Якщо спектральна щільність потужності адитивного шуму є рівномірною в межах смуги пропускання ОЕСС, а розміри зображення об'єкту значно перевищують розміри одного пікселя, то формулу (2.117) можна замінити наближеною формулою

$$\sigma_{mn}^2 = \frac{k_B^2 \sigma_n^2 A_n}{2 A_t \tau_E v_k} \left| \tilde{M}_M \left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right|^2, \quad (2.118)$$

де $A_n = \frac{\rho_x}{v_{yo}}$ - площа кореляції адитивного шуму;

$\rho_x = v_x \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\rho}_{nx}(v_x \cdot V_x) \left| \tilde{M}_M(v_x \cdot V_x) \right|^2 dv_x$ - інтервал кореляції адитивного шуму в

площині зображення у напрямі координати x .

З врахуванням формул (2.114) і (2.118) наближений вираз для розрахунку відношення сигнал/шум mn -ї гармоніки зображення можна подати як

$$\mu_{mn} = \mu_{\max} \sqrt{\frac{2 v_k \tau_E A_t}{A_n}} \left| \tilde{L}'_t \left(\frac{m V_x}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right| \cdot \left| \tilde{H}_{el} \left(\frac{m V_x}{l_x}, \frac{n}{l_y} \right) \right|, \quad (2.119)$$

де $\mu_{mn} = S_{mn} / \sigma_{mn}$ - відношення сигнал/шум mn -ї гармоніки; $\tilde{L}'_t(v_x, v_y) = \frac{1}{A_t} \tilde{L}_t(v_x, v_y)$;

$\mu_{\max} = \frac{\Delta L_M}{\sigma_n}$ - пікове відношення сигнал/шум.

Отримані формули дозволяють розрахувати ймовірність виявлення довільних гармонійних складових зображень об'єктів.

Взявши за основу припущення, що зорова система працює у відповідності до критерію ідеальною спостерігача, алгоритм ухвалення рішення при одиничному спостереженні зводиться до порівняння значення кореляційного інтеграла з порогом, а саме

$$Z_{mn} > \frac{\sigma_{mn}^2 \ln \Lambda_{\max}}{S_{mn}} + \frac{S_{mn}}{2} = Z_{\max} \quad (2.120)$$

де Λ_{\max} - порогове відношення правдоподібності.

Тоді ймовірність правильного виявлення mn -ї гармоніки визначається як:

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\eta_{mn}}^{\infty} \exp\left[-\frac{(\eta - \mu_{mn})^2}{2}\right] d\eta, \quad (2.121)$$

$$\text{де } \eta = Z_{mn} / \sigma_{mn}.$$

Отже параметри виявлення mn -ї гармоніки залежать від відношення сигнал/шум μ_{mn} і від порогового відношення правдоподібності Λ_{\max} .

Ймовірність виявлення рухомої цілі на неструктурованому зображенні описується емпіричною формулою [119]

$$P_d(t) = 1 - \exp(-\alpha K^2 \gamma^3 L_M^{0,3} S_o^2 / V^2), \quad (2.122)$$

де V - швидкість цілі; середнє значення коефіцієнта $\alpha = 2$; K - контраст цілі; L_M - середня яскравість екрана монітора; γ - кутовий розмір цілі.

Закономірності зорового пошуку на зображеннях текстур, що встановлюють залежність ймовірності виявлення від кутових розмірів цілі γ і зони пошуку $2\beta_n$, є експоненціальним розподілом часу пошуку з двома параметрами – час пошуку t_d і час сенсомоторної реакції спостерігача τ

$$\begin{cases} P(t) = 1 - \exp[-(t - \tau) / t_d], t \geq \tau; \\ 0, t < \tau. \end{cases} \quad (2.123)$$

Середній час пошуку t_d для такого розподілу з достатньою точністю може бути представлений як

$$t_d = g[1 + (\gamma - n\psi'')^{-\eta}](\text{tg } \beta / \beta)^\zeta (2 \text{tg } \beta / \gamma)^2 \quad (2.124)$$

де ψ'' - роздільна здатність ока (1"); n - число елементів в цілі, яке відрізняє її від схожих ділянок фону; η і ζ - показники ступенів; g - комплексний коефіцієнт, який враховує складність текстури, яскравість фону і контраст цілі, тренуваність спостерігача. Зокрема, для текстур з середньою щільністю 0,3 [119] при яскравості фону 100 кд/м² і контрасті 0,8 можна прийняти: $g=1,64 \cdot 10^{-3}$, $\eta=0,33$, $\zeta=1,13$ і $n=6$.

Останній множник у формулі (2.124) враховує пропорційність середнього часу пошуку числу ділянок текстури, схожих з ціллю, і дорівнює можливому числу ділянок зображення, що є рівновеликими цілі.

Висновки до розділу 2

Розвинено методи описання процесів перетворення видимого та ІЧ випромінювання в системі «ФЦО - ОЕСС» й створення видимого зображення в полі зору оператора в рамках єдиної математичної моделі окремих інформаційних каналів багатоканальної ОЕСС. Це дозволяє оцінювати якість інтерпретації кінцевого зображення оператором як в ТВ або ТПВ каналах, так і в ОЕСС з комплексуванням.

1. На основі подальшого розвинення теорії та методів описання процесів перетворення інформації в ТВ та ТПВ каналах ОЕСС було створено розрахункову математичну модель окремих спектральних каналів системи «об'єкт – ОЕСС – оператор». Дослідження моделі показали значну відмінність формування сигналів в каналах. У ТВ каналі за різних зовнішніх умов сильно змінюється освітленість вхідної зіниці об'єктива ОЕСС, але вхідний контраст залишається майже постійним. В ТПВ каналі вхідні контрасти є суттєво вищими, а під дією радіаційного нагріву може виникати реверс контрасту, що змінює картину простору об'єктів.

2. Запропонована фізико-математична модель ОЕСС дозволила визначити модуляційну передавальну функцію системи «об'єктив – ПВ», а також дослідити два критерії узгодження роздільної здатності об'єктива і ПВ: рівність МПФ об'єктива і ПВ на певній просторовій частоті; рівність МПФ об'єктива і ПВ на частоті Найквіста.

3. Отримано формулу для розрахунку МПФ системи «об'єктив – ПВ» авіакосмічних ОЕСС при довільних кутах візування θ_{vx} , яка дозволила встановити розміри елемента просторового розділення на поверхні Землі в залежності від кута θ_{vx} . Отримана формула дає можливість визначити просторове розділення ОЕСС з заданими параметрами об'єктива і ПВ.

4. Отримано вдосконалене рівняння для розрахунку МРРТ ТПВ каналу, в основі якого лежить більш достовірна апроксимація МПФ зорової системи. Дослідження отриманих рівнянь на основі моделей Дж. Ллойда і Д.У.Шульца,

показало, що розрахункові значення МРРТ по цим рівнянням істотно відрізняються між собою. Коефіцієнт ширини смуги, що показує відмінність між реальною пропускною здатністю ТПВ каналу з урахуванням зорового сприйняття і ефективної шумової смуги еталонного фільтра, отриманої Дж. Ллойдом, залежить від кутового розміру штриха міри Фуко, а для апроксимації Шульца - не залежить.

5. Показано, що процес комплексування зображень не може бути змодельованим в рамках лінійної моделі системи «ФЦО - ООЕС - оператор» і потребує розробки нового механізму математичного моделювання. Запропоновано комплексування зображень моделювати в рамках апостеріорної напівемпіричної моделі оцінювання якості виконання візуальної задачі оператором ОЕСС.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ «ФОНОЦІЛЬОВА ОБСТАНОВКА – ОЕСС – ОПЕРАТОР»

Модель системи «ФЦО – ОЕСС – оператор» є основною конструкцією, на базі якої проводиться аналіз й синтез самої ОЕСС. Обов'язковим елементом її застосування є методи оцінювання якості рішення на виході системи. Метою цього розділу є дослідження методів оцінки ефективності функціонування інформаційної системи «ФЦО – ОЕСС – оператор» й розробка методу оцінювання ефективності ОЕСС з комплексуванням зображень.

Для оцінки якості комплексованого зображення запропоновано багато показників [130 - 132]. Ці показники в різній мірі корелюють із суб'єктивним сприйняттям зображення оператором, але не дають можливості оцінити процеси перетворення інформації в різних каналах і їх внесок в загальну ефективність системи. З іншого боку, є багато напрацювань по оцінці ефективності функціонування окремих каналів ОЕСС [91, 133], які дозволяють детально дослідити вплив параметрів блоків системи на характеристики зображення, сформованого в одному каналі. Тобто, на сьогоднішній день можлива як оцінка якості комплексування, так і оцінка ефективності окремих каналів ОЕСС, але абсолютно незалежно та без прив'язки одна до одної.

Показник якості комплексованого зображення має враховувати всі ланки інформаційного комплексу «ФЦО – ОЕСС – оператор» (рис. 3.1).

Крім того, доцільно врахувати традиційний підхід до оцінки ефективності одноканальних ОЕСС за допомогою такої «споживчої» характеристики як ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації. Остаточо можна стверджувати, що для оцінки ефективності функціонування ОЕСС необхідно розробити показник, який враховує як процеси формування зображень в окремих каналах, так і особливості комплексування інформації та зорового сприйняття зображення оператором. За основу такого показника можна взяти один з найбільш

адекватних на сьогодні - показник успішності виконання завдання (ТТР - targeting task performance metric) [134]. Даний показник запропоновано для використання замість критерію Джонсона для аналізу сучасних ОЕСС з дискретизацією та цифровою обробкою зображень.



Рис. 3.1. Спрощена модель інформаційних перетворень при спостереженнях

З огляду на відсутність розрахункових засобів оцінювання якості комплексування в загальній моделі системи «ФЦО - ОЕСС - оператор» в цьому розділі вирішується задача створення механізму кількісного визначення ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням при вирішенні конкретної задачі спостереження.

3.1 Загальні підходи до визначення ефективності ОЕСС

Традиційно ефективність ОЕСС оцінюють об'єктивними параметрами і характеристики вхідних блоків ОЕСС, а також суб'єктивними оцінками функціонування з врахуванням зорового сприйняття зображень оператором.

В об'єктивних оцінках використовуються такі показники, як геометрична роздільна здатність, кутове і лінійне розділення, контраст, МПФ, фазова

передавальна функція, коефіцієнт передачі модуляції, градаційна характеристика, відношення сигнал/шум тощо [92].

Суб'єктивні оцінки є значно різноманітнішими та складнішими, ніж об'єктивні. Часто замість ефективності виконання зорової задачі такі показники оцінюють якість зображень. В цьому випадку показники якості розділяють на абсолютні та порівняльні. Абсолютні показники оцінюють тільки саме зображення, а порівняльні потребують наявності деякого референтного зображення [92].

Крім того, показники якості можуть бути частковими та узагальненими (що містять в собі кілька часткових показників) [135, 136].

За багато років досліджень розроблені десятки об'єктивних показників якості зображень. Розробка об'єктивного критерію якості зображення є нетривіальною задачею і останнім часом суттєво ускладнилась. Причиною цього є витіснення одноканальних ОЕСС багатоканальними системами. Тому до звичних вже т.зв. «споживчих» (ймовірність виявлення та розпізнавання, дальність виявлення, час пошуку цілі тощо) і технічних (різних для видимої та інфрачервоної областей спектру) показників якості додалися оцінки ефективності комплексування зображень в багатоканальних ОЕСС [137]. Також потрібно зважати на підвищення вимог до ОЕСС і відповідного зміщення акцентів при аналізі системи «ОЕСС – оператор» [92].

Актуальність показника якості зображень безпосередньо залежать від його користувачів. Умовно можна виділити три групи таких користувачів: замовники ОЕСС, розробники апаратної частини, розробники програмної частини ОЕСС. Перших цікавлять здебільшого узагальнені показники ефективності системи в складі всього комплексу обладнання, що встановлене на носії; другі зацікавлені в аналізі конструктивних та інженерних аспектів впливу кожної ланки системи на вихідне зображення; треті переважну увагу приділяють математичним алгоритмам обробки сигналів і дуже незначну - перетворенням сигналів в оптичному тракті ОЕСС. Очевидно, що з огляду на велику кількість значимих факторів необхідно конкретизувати та обмежувати область досліджень. Насамперед можна розділити етапи зорової діяльності оператора. Робота системи «ОЕСС – оператор»

складається з послідовного виконання кількох типових завдань: пошук та виявлення заданого об'єкту, розпізнавання та ідентифікація об'єкту, усвідомлення ситуації (situation awareness). На кожному з цих етапів використовується інформація з різних каналів і їх комбінацій. Ймовірно, що методи комплексування інформації в каналах будуть різними. В той же час відображення інформації здійснюється, як правило, одним пристроєм. Отже можна припустити, що для одної системи «ОЕСС – оператор» показник якості зображення буде змінюватись в залежності від поточної задачі, процесів перетворення інформації в вхідному оптичному блоці та в блоці цифрової обробки [92].

Зорове сприйняття зображення, яке формується бортовою ОЕСС, залежить від контексту виконуваної задачі. Пошук та виявлення об'єкту в реальній ситуації як правило об'єднуються в одну задачу. Моделі механізмів зорового сприйняття при виконанні цієї задачі є найпростішими серед інших. Слушно було б чекати також відносної простоти і ефективності алгоритмів комплексування інформації на цьому етапі. Але отримані експериментальні результати є неоднозначними. Так, наприклад, виявлення пішохода в нічних зображеннях дороги, сформованих ТВ та короткохвильовою ТПВ камерами, було кращим при наявності комплексування, ніж без нього [135]. Такі ж результати дали психофізіологічні дослідження зорового пошуку на природних фонах [138, 139] при використанні зображень окремих каналів та комплексованого зображення. В той же час встановлено, що не завжди традиційні алгоритми комплексування, наприклад, такі, як метод головних компонент (PCA), покращують виявлювальну здатність системи «ОЕСС – оператор» [140].

Задачі розпізнавання та ідентифікації об'єкту на комплексованих кольорових зображеннях вирішуються операторами як правило швидше, ніж на зображеннях з окремих каналів, або на комплексованих монохромних зображеннях [141, 142]. В деяких випадках монохромні методи комплексування дають гірші результати, ніж окремі канали [142].

Situation awareness - усвідомлення ситуації, є досить новою концепцією змістовного аналізу навколишньої обстановки оператором. Ця концепція останнім

часом набуває широкої популярності в інтерпретації М.Р. Ендслі [143] і ґрунтується на ідеї усвідомлення оператором елементів навколишнього середовища, їх розуміння в контексті змісту поточного завдання і прогнозування майбутнього стану навколишньої обстановки. Цілком ймовірно, що з огляду на значне підвищення вимог до ефективності ОЕСС, задача усвідомлення ситуації стане стандартною в методиках розрахунків цих систем. Дослідження впливу комплексування зображень на усвідомлення ситуації оператором виявили позитивний ефект для тих методів, що використовувались [140, 144].

Показники якості, що зазвичай використовуються при оцінці комплексування зображень, можна розділити на три групи в залежності від параметрів, які входять до складу показника [145]:

- параметри тільки вихідного комплексного зображення;
- параметри вихідного та референтного ідеального зображень;
- параметри вихідного зображення та зображень окремих каналів.

До першої групи можна віднести середньоквадратичну похибку, ентропію зображення, показники, що базуються на відношенні сигнал/шум або контрасту зображення тощо. Прикладом другої групи показників є різницеве пікове відношення сигнал/шум, розраховане на основі розподілення Вігнера [146]. Очевидно, що походження вихідного зображення, в тому числі - попереднє комплексування, не впливає на оцінювання якості за першими двома групами показників. Тому тут можна використовувати також і показники, які широко розповсюджені в дослідженнях ефективності зорового сприйняття, наприклад, критерії на основі порогових контрастів [147, 148], алгоритми оцінювання різниці енергій спотвореного та ідеального зображень [149]. Серед показників третьої групи використовуються взаємна ентропія [150], інформаційна схожість [130], якість передачі контурів [151, 132], показник структурної схожості [152].

Була досліджена поведінка трьох типів показників якості – імовірісного на основі порогових контрастів, різницевої енергії зображень та структурної схожості при оцінці виявлення та розпізнавання зображення людини на слабо структурованому фоні в видимому та середньому інфрачервоних діапазонах у

різних умовах освітлення. Перехід від задачі виявлення до задачі розпізнавання моделювався збільшенням масштабу зображення в 2 рази і зміщенням об'єкта в центр поля зору. Розглядались тільки чорно-білі зображення в кожному окремому каналі та комплексоване адитивне зображення з різними ваговими коефіцієнтами. Розраховані показники якості порівнювались з суб'єктивною оцінкою. Встановлено, що на етапі виявлення об'єкта комплексовані зображення здебільшого забезпечують кращі суб'єктивну та імовірнісну оцінки. При розпізнаванні частіше кращі результати показував канал видимого діапазону. Явної відповідності між змінами суб'єктивної та об'єктивних не імовірнісних показників якості при переході від однієї задачі до іншої не встановлено [145].

Аналіз перелічених показників якості свідчить про те, що жоден з них не перекриває всіх етапів роботи системи «ОЕСС – оператор». На наш погляд це суттєво зменшує адекватність оцінювання перетворення інформації в усьому тракті її проходження в різні проміжки часу. Тобто за умови багатоканальності ОЕСС середовище комплексування [10] не може бути відображене в рамках єдиної моделі. Найбільш узагальненим показником якості зображення залишається ймовірність виконання поточної задачі системою «ОЕСС – оператор». Алгоритм обчислення такого показника має включати всі основні фактори формування вихідного зображення, але в першу чергу – давати можливість аналізу технічних параметрів ОЕСС. Єдиний алгоритм оцінки якості зображення ні протязі всього функціонування системи «ОЕСС – оператор» дасть змогу визначити збалансованість системи на різних етапах виконання візуального завдання. Таким узагальненим показником може бути, наприклад, дальність спостереження, ймовірність виконання візуальної задачі, точність прицілювання. Єдиний показник якості дозволить оцінювати збалансованість системи «ОЕСС – оператор» в різних умовах функціонування.

Враховуючи різноманітність завдань, які вирішують ОЕСС, для характеристики їх якості використовують просторове, енергетичне, часове та спектральне розділення. Для більшості ОЕСС, що працюють у статичному режимі, важливо забезпечити високе просторове й енергетичне розділення. Для систем, що

працюють у динамічному режимі, крім високого просторового й енергетичного розділення, важливо забезпечити і часове розділення. Для ОЕСС, які ведуть спостереження одночасно в декількох спектральних діапазонах, іноді важливо забезпечити ще й високе спектральне розділення [92].

Суб'єктивна якість одного і того ж зображення істотно відрізняється у різних спостерігачів, а також змінюється у часі для одного спостерігача. Тому якість зображення не можна оцінювати в абсолютних величинах. Існують численні формули для оцінки якості зображення, кожна з яких отримана для конкретних умов спостереження емпіричним шляхом. Усі вони тією чи іншою мірою використовують дві основні характеристики – просторову й енергетичну роздільну здатність [153].

Просторова роздільна здатність ОЕСС характеризує можливість системи роздільно спостерігати об'єкти мінімальних просторових розмірів. Сучасний підхід до оцінки роздільної здатності ОЕСС ґрунтується на теорії лінійної просторової фільтрації, у рамках якої процес спостереження розглядають як просторову фільтрацію об'єкта спостереження багатоланцюговим двовимірним фільтром. Граничне розділення визначають просторовою частотою, на якій МПФ ОЕСС зменшується до певного рівня, наприклад, до рівня 0,5 [92].

Енергетична роздільна здатність (контрастна чутливість) характеризує можливість розділення (виявлення) сигналів від об'єктів великих розмірів, розміщених на фоні, за рахунок наявного контрасту [92].

Максимальна дальність спостереження (МДС) – це максимальна дальність, на якій ОЕСС забезпечує виявлення або розпізнавання об'єкта із заданою ймовірністю. Гранична дальність спостереження залежить одночасно як від просторового, так і від енергетичного розділення [92].

Для аналізу та синтезу ОЕСС показники ефективності визначаються в межах розрахункових моделей, деякі з блоків яких розглянуто в попередньому розділі. Сотні розрахункових оціночних моделей можна умовно розділити на чотири типи [154]:

- моделі з урахуванням психофізіологічних особливостей зорового сприйняття людини;
- моделі на основі штучних алгоритмів виділення значимих ознак;
- моделі на основі теоретичних спрощень та тестових об'єктів;
- прогностичні емпіричні моделі.

Моделі першого типу базуються на відомих законах зорового сприйняття [155] та особливостях будови зорової системи людини [156]. Прикладами таких моделей є British Aerospace ORACLE6 model, Georgia Tech Vision (GTV), Wilson's Spatial Vision model, and the cortex transform-based distortion metric. Як правило вони є досить складними і враховують складні багатофакторні механізми візуальної діяльності людини.

Моделі другого типу побудовані на алгоритмах виділення в зображенні заданих типів специфічних ознак/елементів. При цьому зміст таких елементів зовсім не обов'язково є пов'язаним з реальними механізмами зорового сприйняття. Прикладами таких моделей є теорія компонентного розпізнавання [157], симетрія об'єктів [158], текстурно орієнтований пошук [159] тощо. Використання таких моделей досить добре підходить для лабораторних випробувань, але далеко не завжди адекватно відображає виконання реальних зорових задач.

В моделях третього типу оцінюється наявність в зображенні інформації певного типу, яка не містить безпосередньо елементів зображення. Зазвичай більша кількість такої інформації означає кращу ефективність. Часто такі моделі є одновимірними, наприклад, кількість штрихових елементів в критичному розмірі об'єкта [160], видимість [161], складність [162]. Перевагою таких моделей є розрахункова простота і хороша точність. Тому на їх основі побудовані широко використовувані оціночні методики, наприклад, NVESD, FLIR92, ACQUIRE. Запропоновані відносно нові моделі цього класу – визначення орієнтації диску або трикутника [163].

Моделі четвертого типу [164, 165] є застарілими і не набули розповсюдження. Чисто емпіричні моделі не дозволяють адекватно прогнозувати поведінку системи при зміні умов спостереження.

3.2 Оцінки просторового розділення ОЕСС

Просторова роздільна здатність ОЕСС визначає можливості системи спостерігати окремо близько розташовані об'єкти. Традиційними оцінками просторового розділення для оптичної системи є діаметр кружка Ері, критерій Релея, розмір абераційної плями в площині ПВ. Також для дистанційних ОЕСС використовуються кутовий розмір пікселя ПВ або величина проекції пікселя в площині предметів. Такі оцінки є досить грубими і придатні тільки для попередніх розрахунків [92].

На практиці обов'язковим є врахування контрасту, а часто – часового розділення. Найбільш адекватним є просторово-частотний опис просторового розділення з застосуванням функцій передачі модуляції [92].

Найпростішою характеристикою просторового розділення авіакосмічних ОЕСС є геометричне розділення на поверхні Землі. В лінійних величинах лінійне розділення на поверхні Землі (Ground sample distance - GSD) – це мінімальна відстань між двома точковими джерелами випромінювання на поверхні Землі однакової інтенсивності, при якій ОЕСС спостерігає точки роздільно. Аналогічно визначається кутове розділення [92].

Просторове розділення δV на поверхні Землі з геометричних міркувань дорівнює

$$\delta V = H \frac{V_s}{f_o'}, \quad (3.1)$$

де V_s – просторове розділення, яке забезпечує система «об'єктив - МПВ». Якщо об'єктив не спотворює зображення (є ідеальним), то $V_s = V_D$, де V_D розмір пікселя матриці.

В загальному випадку повздовжнє та поперечне просторове розділення при нахилі оптичної вісі визначається формулами (2.57) та (2.58).

Якщо МПФ об'єктива й МПВ однаково спотворюють зображення, тобто їх МПФ погоджені між собою згідно з умовою $M_o(\nu_{res}) = M_D(\nu_{res}) = 0,5$, то, як показано в [103], просторове розділення на поверхні Землі визначається за

формулою

$$\delta V = H \frac{1,49V_D}{f_o'} . \quad (3.2)$$

На практиці, особливо для ТПВ каналів просторове розділення ОЕСС часто оцінюють по функції передачі контрасту (ФПК, Contrast Transfer Function - CTF), яка обумовлена реакцією системи на періодичний тест-об'єкт із прямокутним, а не синусоїдальним законом зміни яскравості або прозорості. В разі заміни об'єкту з синусоїдальним розподілом енергетичної яскравості на штрихову тест-міру, вхідний сигнал є сумою елементарних синусоїд з частотами, кратними $2n + 1$, де n - номер гармоніки. Для перерахунку МПФ по штриховому тест-об'єкту зазвичай використовують формулу Колтмена [166]. Залежність МПФ від CTF для деякої частоти ν має вигляд

$$M(\nu) = K_c(\nu) = \frac{\pi}{4} \left[K_n(\nu) + \frac{K_n(3\nu)}{3} - \frac{K_n(5\nu)}{5} + \frac{K_n(7\nu)}{7} - \frac{K_n(9\nu)}{11} + \dots \right] , \quad (3.3)$$

де $K_c(\nu)$ - контраст зображення синусоїдальної міри з частотою ν ; $K_n(\nu)$ - контраст зображення прямокутної міри з частотою ν ;

а обернена залежність має вигляд

$$K_n(\nu) = \frac{4}{\pi} \left[M(\nu) - \frac{M(3\nu)}{3} + \frac{M(5\nu)}{5} - \frac{M(7\nu)}{7} + \frac{M(9\nu)}{9} - \frac{M(11\nu)}{11} + \dots \right] . \quad (3.4)$$

Зазвичай можна обмежитися першими трьома або чотирма членами формули, оскільки наступні члени мають невеликі значення. Для першої гармоніки модульованого сигналу формули (3.3), (3.4) спрощуються:

$$M(\nu) = \frac{\pi}{4} \cdot K_n(\nu), \quad K_n(\nu) = \frac{4}{\pi} \cdot K_c(\nu) .$$

Просторова частота, при якій МПФ зменшується до деякого заданого рівня, наприклад до значення граничного мінімального контрасту, що може бути виявленим спостерігачем або всією системою, часто служить оцінкою просторового розділення. Іноді за неї приймають частоту Найквіста, яка дорівнює половині частоти просторової вибірки зображення в ОЕСС. В інших випадках цією частотою може бути перший мінімум просторово-частотної характеристики ПВ,

що дорівнює оберненому значенню елементарного кутового поля $2\Delta\omega$ [92].

У телебаченні досить давно використовується запропонований О. Шаде критерій просторового розділення, що вимагає, щоб МПФ системи на частоті Найквіста f_N не перевищувала 0,15. Модифікований критерій О.Шаде визначається як [9, 133]:

$$R_x = \frac{1}{2\Delta f_x} = \frac{1}{2 \int_0^\infty |M_s(f_x)|^2 df}, \quad (3.5)$$

де Δf_x - ефективна смуга пропускання просторових частот Δf_x ; $M_s(f_x)$ просторово-частотна характеристика усієї ОЕСС.

Розглянемо метод розрахунку лінійного просторового розділення на місцевості дистанційною, наприклад, авіакосмічною ОЕСС з урахуванням енергетичних і просторових параметрів об'єкта спостереження, стану атмосфери, якості зображення, сформованого об'єктивом, матричної структури приймача випромінювання, розмиття зображення за рахунок руху супутника під час експозиції та ймовірності виявлення об'єкта [92].

Результуючий контраст зображення залежить від контрасту об'єкта спостереження $C_{i0}(v_x)$, МПФ атмосфери $M_a(v_x)$, МПФ об'єктива $M_o(v_x)$, МПФ МПВ $M_D(v_x)$, а також від МПФ, яка характеризує лінійне $M_{vl}(v_x)$ і кутове $M_{va}(v_x)$ зміщення осі візування під час експозиції. Аналогічно (2.1) для лінійної інваріантної системи, якою при певних обмеженнях є ОЕСС, сумарна МПФ дорівнює добутку зазначених вище МПФ:

- в напрямку польоту носія

$$M_s(v_x) = M_a(v_x)M_o(v_x)M_D(v_x)M_{vl}(v_x)M_{va}(v_x); \quad (3.6)$$

- в напрямку, перпендикулярному до напрямку польоту носія

$$M_s(v_y) = M_a(v_y)M_o(v_y)M_D(v_y)M_{va}(v_y). \quad (3.7)$$

За умови правильного вибору параметрів ОЕСС $M_{Dt}(f) \approx 1$. МПФ $M_v(v_x)$ враховує спотворення зображення під час експонування за рахунок руху носія. Зміщення зображення відбувається в фокальній площині об'єктива. Як

правило, це лінійний зсув, що зумовлений лінійним або кутовим рухом носія. Він описується наступними функціями:

- при лінійному переміщенні носія

$$\Delta x'_l = \frac{v_f t_e f'_o}{H}; \quad (3.8)$$

- при кутовому переміщенні носія

$$\Delta x'_a = f'_o \operatorname{tg}(\omega_a t_e), \quad (3.9)$$

де $\Delta x'_l$, $\Delta x'_a$ - зрушення зображення в фокальній площині при лінійному і кутовому переміщенні носія відповідно; v_f - швидкість руху носія; H - висота супутника; ω_a - кутова швидкість нахилу оптичної осі; t_e - час експонування.

При такому зсуві відбувається розмиття зображення, яке можна описати функціями:

- при лінійному переміщенні носія

$$M_{vl}(v_x) = \operatorname{sinc}(\Delta x'_l v_x); \quad (3.10)$$

- при кутовому переміщенні носія

$$M_{vl}(v_x) = \operatorname{sinc}(\Delta x'_a v_x). \quad (3.11)$$

3.3 Оцінки енергетичного розділення

Температурне і температурно-частотне (температурно-просторове) розділення ОЕСС по відношенню до протяжних об'єктів оцінюється за допомогою ряду параметрів, до яких насамперед належать [167, 9, 133]:

- еквівалентна шумова температура (NET), що визначається як температура еквівалентного чорного тіла, поміщеного в площину об'єкта, випромінювання якого створює на виході ОЕСС відношення сигнал-шум, що дорівнює одиниці;
- еквівалентна шуму різниця температур (ΔT_n , NETD), що визначається як мінімальна різниця температур двох випромінювачів, наприклад об'єкта і навколишнього його фону або окремих їх фрагментів, прийнятих за чорні тіла, при

якій різниця сигналів, створюваних цими випромінювачами на виході ПВ при послідовному в часі їх спостереженні (скануючі ОЕСС) або одночасно на окремих елементах повноформатних МПВ, дорівнює шуму приймача;

- мінімальна виявлювана різниця температур ($\Delta T_{pв}$, MDTD, Minimum Detectable Temperature Difference), що визначається необхідною тренованому спостерігачу для виявлення тест-об'єкта (звичайно - квадратної або круглої міри) різницею температур тест-об'єкта і однорідного фону, на якому він спостерігається через ОЕСС. При цьому спостерігач приблизно знає місце розташування тест-об'єкта і має в своєму розпорядженні достатній час для його виявлення;
- мінімальний роздільний контраст (MRC, Minimum Resolvable Contrast), який визначається контрастним порогом чутливості ОЕСС, тобто мінімальним контрастом між об'єктом і фоном, який розрізняє система.

Окремо доцільно розглядати мінімальну роздільну різницю температур (ΔT_p , MRTD), яка є поєднанням просторових й енергетичних характеристик.

При спостереженні малорозмірних (точкових) об'єктів енергетичне розділення ОЕСС можна оцінювати еквівалентним шуму опроміненням або еквівалентним шуму пороговим потоком, тобто значеннями опромінення або потоку на вході системи, при яких амплітуди сигналів дорівнюють середнім квадратичним значенням шумів [91].

Однією з базових характеристик ОЕСС, яка визначає енергетичне розділення, є функція передачі сигналу ФПС $u_s(L_t)$. Для отримання функціональної залежності $u_s(L_t)$ розглянемо рис. 3.2 [91]. Нехай об'єкт спостереження має рівномірну по площі спектральну яскравість $L_t(\lambda)$, а його кутові розміри $\xi_{tx} \times \xi_{ty}$ значно перевищують миттєве поле зору ОЕСС, яка розташована на відстані R від об'єкта спостереження. Будемо також вважати, що поверхня об'єкта випромінює по закону Ламберта. Тоді

$$L_t(\lambda) = \frac{1}{\pi} \varepsilon_t(\lambda) M_\lambda(\lambda, T_t), \quad (3.12)$$

де $\varepsilon_t(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт випромінювання поверхні об'єкта; $M_\lambda(\lambda, T_t)$ – функція Планка [92].

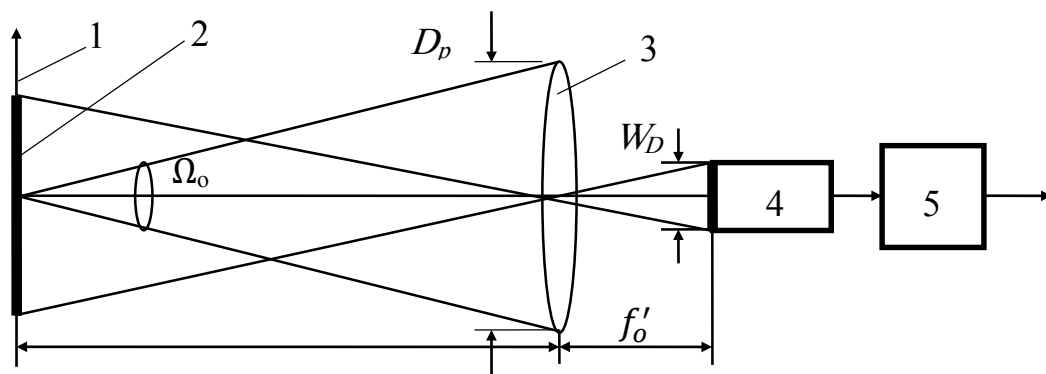


Рис. 3.2. До розрахунку функції передачі сигналу ОЕСС: 1 – площина об'єкта випромінювання; 2 – миттєве лінійне поле зору; 3 – ОС; 4 – ПВ; 5 – еталонний фільтр

Для ОЕСС спектральна яскравість поверхні об'єкта визначається як

$$L_t(\lambda) = \rho_t(\lambda) \frac{E_\lambda(\lambda)}{\pi}, \quad (3.13)$$

де $\rho_t(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт відбиття поверхні об'єкта; $E_\lambda(\lambda)$ – спектральна освітленість об'єкта (природна або штучна).

Якщо поверхня об'єкта розташована перпендикулярно до осі спостереження, то до вхідної зіниці ОЕСС надходить спектральний потік випромінювання

$$\Phi_\lambda(\lambda) = \tau_A(\lambda) L_{\lambda_t}(\lambda) A_t \Omega_o, \quad (3.14)$$

де $\tau_A(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери; A_t – площа об'єкта, що знаходиться у межах миттєвого поля зору ОЕСС; $\Omega_o = A_p / R^2$ – тілесний кут, у межах якого випромінювання від об'єкта надходить до вхідної зіниці ОС площею A_p .

Сигнал на виході ПВ із спектральною чутливістю $R_D(\lambda)$ дорівнюватиме [92]

$$u_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda = A_t \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_{\lambda_t}(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (3.15)$$

Формулу (3.15) можна представити у вигляді

$$u_s = A_t \frac{A_p}{R^2} L_{\lambda t, \max} R_{D, \max} (\Delta \ln \lambda) \quad (3.16)$$

де $\Delta \ln \lambda$ – відносна спектральна ширина смуги пропускання ОЕСС, яка визначається співвідношенням

$$\Delta \ln \lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) L_{\lambda t}(\lambda) \tau_o(\lambda) R_{Dn}(\lambda) d\lambda, \quad (3.17)$$

де $L_{\lambda t}(\lambda)$ – відносна (нормована) спектральна яскравість об'єкта; $R_{Dn}(\lambda)$ – відносна спектральна чутливість ПВ.

При вимірюванні ФПС вважають, що тест-об'єкт знаходиться на невеликій відстані від ОЕСС, тобто $\tau_A(\lambda) \approx 1$, а спектральний коефіцієнт пропускання ОС у межах робочого спектрального діапазону має середнє значення τ_o . Тоді ФПС ОЕСС з урахуванням коефіцієнта підсилення електронного блоку C_{EI} та співвідношень $A_p = \pi D_o^2 / 4$ і $A_t / R^2 = A_D / f_o'^2$, яке впливає із рис. 3.2, матиме вигляд [92]

$$u_s(L_t) = \frac{\pi}{4} C_{EI} A_D \left(\frac{D_o}{f_o'} \right)^2 \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_t(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda. \quad (3.18)$$

Функція $u_s(L_t)$ має складний вигляд, який залежить, перш за все, від робочого спектрального діапазону та спектральної чутливості ПВ, що ускладнює вимірювання істинної яскравості об'єкта. Формула (3.18) не враховує спектральний склад електричного сигналу, який визначається системою сканування. Крім того, на величину сигналу u_s впливає коефіцієнт підсилення C_{EI} та шуми системи [92].

Однією з важливих характеристик блоків ОЕСС, яка входить до складу більш узагальнених характеристик, є відношення сигнал/шум. Це відношення визначається для різних точок структурній схемі ОЕСС і враховує і внутрішні, і зовнішні джерела шумів, а також вплив випадкових неконтрольованих змін корисного сигналу і всіляких перешкод, наприклад нестаціонарних в часі і просторі

змін яскравості фону. Найбільш часто це відношення розглядається на виході ПВ [92]

$$\mu = \frac{\int_{\lambda} \int_f S(\lambda, f) \Delta\Phi'_e(\lambda, f) d\lambda df}{\sqrt{\int_f U_{\text{ш}}(f) df}}, \quad (3.19)$$

де λ – довжина хвилі випромінювання; f – частота, Гц; $S(\lambda, f)$ – чутливість ПВ; $\Delta\Phi'_e(\lambda, f)$ – потік випромінювання на ПВ; $U_{\text{ш}}(f)$ – спектральна щільність потужності шумів, приведених до виходу ПВ.

Цей вираз не враховує залежність функцій $S(\lambda, f)$ і $\Delta\Phi'_e(\lambda, f)$ від кутів падіння потоку на чутливу площадку, оскільки для малих кутів і площ вони зазвичай можуть бути прийняті постійними [92].

Крім загального випадку, коли спектральна щільність потужності шумів і завад (спектр Вінера) в знаменнику (3.19) розглядається як сума зовнішніх і внутрішніх складових шуму, часто використовуються більш прості, але цілком прийнятні для різноманітних практичних застосувань вирази. Так, у разі переважання внутрішніх шумів приймача випромінювання, що враховуються за допомогою питомої виявлювальної здатності приймача $D^*(\lambda, f, \Delta f_e)$ величина μ визначається як [92]

$$\mu = \int_{\Delta\lambda} \frac{\Delta\Phi_e(\lambda) \tau_0(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda}{\sqrt{A_D \Delta f_e}}, \quad (3.20)$$

де $\tau_0(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт пропускання оптичної системи; $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ – робочий спектральний діапазон ОЕСС.

Якщо визначити потоки $\Delta\Phi_e$, які приходять на вхід ОЕСС, через силу випромінювання $I_c(\lambda)$ (для точкового випромінювача), то матимемо

$$\mu = \frac{A_p}{l^2 \sqrt{A_D \Delta f_e}} \int_{\Delta\lambda} \tau_c(\lambda) \tau_0(\lambda) I_c(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda. \quad (3.21)$$

Для протяжного випромінювача, який перекриває елементарне кутове поле $\Delta\Omega_e$, маємо

$$\mu = \frac{A_p \Delta \Omega_e}{\sqrt{A_D \Delta f_e}} \int_{\Delta \lambda} \tau_c(\lambda) \tau_0(\lambda) L_c(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda. \quad (3.22)$$

У цих формулах не враховується залежність S і D^* від частоти f , тобто S і D^* приймаються постійними в межах Δf_e .

Якщо яскравість реальних випромінювачів виразити через коефіцієнт випромінювання $\varepsilon(\lambda)$ і яскравість чорного тіла $L_c^{\text{чт}}(\lambda)$, то (3.22) можна переписати як

$$\mu = \frac{A_p \Delta \Omega_e}{\sqrt{A_D \Delta f_e}} \int_{\Delta \lambda} \tau_c(\lambda) \tau_0(\lambda) \varepsilon(\lambda) L_c^{\text{чт}}(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda. \quad (3.23)$$

Іноді зручно використовувати фотонну форму подання сигналів, тобто виражати яскравість $L_c^{\text{чт}}$ через число фотонів $L_q^{\text{чт}}$ з енергією hc/λ , що падають на приймач

$$L_q^{\text{чт}} = \frac{L_c^{\text{чт}}}{\frac{hc}{\lambda}}, \quad (3.24)$$

а також враховувати притаману більшості фотонних приймачів залежність

$$D^*(\lambda) = \frac{\lambda D_{\text{max}}^*}{\lambda_{\text{max}}}, \quad (3.25)$$

де D_{max}^* - максимальне $D^*(\lambda)$ на відповідній довжині хвилі λ_{max} .

На перших етапах аналізу і розрахунку параметрів і характеристик багатьох ОЕСС часто розглядається спрощена енергетична модель системи, коли на вхід ОЕСС надходить або адитивна суміш сигналу від спостережуваного об'єкта, атмосфери і фону, або тільки сигнал від фону і середовища. У цьому випадку важливо визначити контрастне відношення сигнал/шум μ_k як

$$\mu_k = \frac{u_{t+b} - u_b}{\sigma_{\text{ш}}}, \quad (3.26)$$

де u_{t+b} – сигнал на виході чутливого елемента приймача випромінювання за наявності об'єкта і фону в кутовому полі $\Delta \Omega_e$; u_b – сигнал на виході приймача, коли об'єкт відсутній і всі кутове поле $\Delta \Omega_e$ займає фон [92].

Зміна сигналу $\Delta u = u_{t+b} - u_b$ може відповідати випадку переходу (послідовного опитування) від одного пікселя МПВ, на якому присутнє зображення

об'єкта, до іншого, на якому міститься тільки зображення фону, або появи об'єкта, на стаціонарному фоні. Користуючись співвідношеннями, не складно отримати вираз для зміни потоку випромінювання $\Delta\Phi_e$ в діапазоні $\Delta\lambda$, якому відповідає зміна сигналу Δu

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_e = & A_p \Delta\Omega_t \int_{\Delta\lambda} [L_{t1}(\lambda) - L_{b1}(\lambda)] d\lambda = \\ & A_p \Delta\Omega_t \int_{\Delta\lambda} \left\{ \left[\varepsilon_t(\lambda) [L_t(\lambda, T_t) + \frac{1}{\pi} \rho_t E_t(\lambda)] \prod_{n=1}^{n_{o6}} \tau_{cn}(\lambda) + \right. \right. \\ & \left. \sum_{n=1}^{n_{o6}} L_c(T_{cn}) \prod_{j=1}^{n-1} \tau_{cj}(\lambda) [1 - \tau_{cj}(\lambda)] - \left[\varepsilon_b(\lambda) L_b(\lambda, T_b) + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{1}{\pi} \rho_b(\lambda) E_b(\lambda) \right] \prod_{n=1}^{n_{\Phi}} \tau_{cn}(\lambda) - \sum_{n=1}^{n_{\Phi}} L_c(T_{cn}) \prod_{j=1}^{n-1} \tau_{cj}(\lambda) [1 - \tau_{cj}(\lambda)] \right\} d\lambda. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Зазвичай, наприклад при однакових відстанях від ОЕСС до об'єкта і фону, тобто при знаходженні їх в одному шарі середовища ($n_t = n_b$), цю формулу і її подібні можна помітно спростити. При переважанні внутрішніх шумів вираз (3.22) для випадку утворення контрастного відношення сигнал/шум можна переписати, замінивши яскравість z на різницю яскравостей об'єкта і фону [92]

$$\mu_k = \frac{A_p \Delta\Omega_e}{\sqrt{A_D \Delta f_e}} \int_{\Delta\lambda} (L_{t1}(\lambda) - L_{b1}(\lambda)) \tau_0(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda, \quad (3.28)$$

При невеликій відмінності ΔT в температурах об'єкта T_{o6} і фону T_{Φ} можна прийняти, $L_{t1}(\lambda) \approx L_{b1}(\lambda) = L_b(\lambda)$ і приблизно записати

$$L_{t1}(\lambda) - L_{b1}(\lambda) = \frac{dL_c(\lambda)}{dT} \Delta T. \quad (3.29)$$

Тоді для спрощення енергетичної моделі ОЕСС, що враховує тільки власні випромінювання об'єкта і фону, тобто при $\tau_{ct}(\lambda) = \tau_{cb}(\lambda) = \tau_c(\lambda)$, $\varepsilon_t(\lambda) = \varepsilon_b(\lambda) = 1$ та $\Delta\Phi_e = A_p \Delta\Omega_t \int_{\Delta\lambda} [L_{t1}(\lambda) - L_{b1}(\lambda)] d\lambda$, замість (3.28) можна записати

$$\mu_k = \frac{A_p \Delta\Omega_e}{\sqrt{A_D \Delta f_e}} \int_{\Delta\lambda} \tau_c(\lambda) \tau_0(\lambda) \frac{dL_c(\lambda)}{dT} D^*(\lambda) d\lambda. \quad (3.30)$$

Для фотонної форми представлення сигналів при квантовій ефективності приймача випромінювання $\eta_q(\lambda)$ зареєстроване ОЕСС число фотонів, що

відповідає різниці потоків від об'єкта і фону за час накопичення сигналу t_n , становить

$$\Delta n = A_p \Delta \Omega t_n \int_{\Delta \lambda} \tau_c(\lambda) \tau_0(\lambda) [L_{o61}(\lambda) - L_{\phi 1}(\lambda)] \eta_q(\lambda) d\lambda. \quad (3.31)$$

При цьому відношення сигнал/шум дорівнює

$$\mu_q = \frac{\Delta n}{\sqrt{\sigma_n^2}}, \quad (3.32)$$

де зазвичай вважають, що дисперсія флуктуацій числа фотонів σ_n^2 визначається як сума дисперсій флуктуацій числа фотонів, що потрапляють на приймач від спостережуваної сцени і від елементів конструкції ОЕСС (світлофільтрів, оправ, діафрагм тощо).

3.3.1 Освітленість, що еквівалентна шуму

Еквівалентну шуму освітленість визначимо наступним чином. Нехай об'єкт має рівномірну по площі спектральну яскравість $L_t(\lambda)$, а його кутові розміри значно перевищують миттєве поле зору ОЕСС, яка розташована на відстані R від об'єкта спостереження. Розглянемо окремо визначення NEI для ТПВ каналу та для ТВ каналу ОЕСС.

3.3.1.1 ТПВ канал

Об'єкт розташовано на рівномірному фоні із спектральною яскравістю $L_b(\lambda)$. Будемо також вважати, що поверхні об'єкта і фона випромінюють по закону Ламберта. Освітленість, що є еквівалентною шуму, NEI визначимо за формулою

$$NEI = E_p \frac{u_n}{u_s}, \quad (3.33)$$

де E_p – освітленість вхідної зіниці, яка створює сигнал u_s ; u_n – сумарне значення СКВ шуму.

Корисний сигнал на виході ПВ є різницею між сигналами, що утворюються об'єктом і фоном, тобто [91]

$$u_s = u_{st} - u_{sb} = A_t \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) \tau_o(\lambda) R_D(\lambda) d\lambda, \quad (3.34)$$

де $\Delta L(\lambda) = L_t(\lambda) - L_b(\lambda)$ – абсолютний контраст яскравості.

Спектральна чутливість ПВ дорівнює $R_D(\lambda) = D^*(\lambda) \frac{u_n}{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}$. Тоді

відношення сигнал/шум на виході ПВ становить

$$\frac{u_s}{u_n} = \frac{A_t}{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}} \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) \tau_o(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda. \quad (3.35)$$

Спектральна освітленість вхідної зіниці ОЕСС дорівнює

$$E_p(\lambda) = \frac{\Phi_\lambda(\lambda)}{A_p} = \tau_A(\lambda) L_t(\lambda) A_t \frac{1}{R^2}. \quad (3.36)$$

Отже остаточно з урахуванням (3.35) і (3.36) маємо

$$NEI = \frac{A_t}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) d\lambda \times \frac{1}{\frac{A_t}{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}} \frac{A_p}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) \tau_o(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda} = \frac{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}{A_p \cdot D_r^*}, \quad (3.37)$$

де питома виявлювальна здатність ПВ, приведена до площини вхідної зіниці об'єктива розраховується як

$$D_r^* = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) \tau_o(\lambda) D^*(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \Delta L(\lambda) d\lambda}. \quad (3.38)$$

3.3.1.2 ТВ канал

Для випадку ТВ каналу з фотонним матричним ПВ враховується відбите об'єктом випромінювання. Об'єкт з коефіцієнтом дифузного відбиття $\rho_i(\lambda)$

підсвічується джерелом випромінювання з колірною температурою T_k . Це джерело створює у поверхні об'єкта інтегральну енергетичну освітленість E_e . Частина випромінювання, відбитого об'єктом, проходить через атмосферу, що має коефіцієнт пропускання $\tau_A(\lambda)$, і потрапляє в оптичну систему, що складається з об'єктива й фотонного МПВ. Об'єктив має фокусну відстань f' , діаметр вхідної зіниці D_p і коефіцієнт пропускання $\tau_o(\lambda)$. МПВ встановлено в задній фокальній площині об'єктива.

У загальному випадку, випромінювання джерела може мати складний спектральний склад, який на поверхні об'єкта характеризується спектральною щільністю освітленості $E(\lambda)$. Вираз для інтегральної освітленості в площині об'єкта буде мати вигляд:

$$E_e = \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda, \text{ Вт/м}^2.$$

Для випадку, коли кутові розміри об'єкта $\omega_{об}$ значно перевищують кутову межу розділення об'єктива оптичної системи δ_{oc} , і об'єкт віддалений від ОЕСС на відстань, що значно перевищує фокусну відстань об'єктива f' , спектральна освітленість в площині зображення складає

$$E'_{\lambda}(\lambda) = \frac{\tau_A(\lambda)\tau_o(\lambda)\rho_t(\lambda)E_{\lambda}(\lambda)\left(\frac{D}{f'}\right)^2}{4} = \frac{\tau_A(\lambda)\tau_o(\lambda)\rho_t(\lambda)E_{\lambda}(\lambda)}{4k_{eff}^2}, \quad (3.39)$$

де k_{eff}^2 – ефективне діафрагмове число об'єктива.

У цьому випадку енергетична освітленість в площині чутливого шару матричного ПВ визначатиметься виразом

$$E'_e = \int_0^{\infty} E'_{\lambda}(\lambda) d\lambda = \frac{1}{4k_{eff}^2} \int_0^{\infty} E_{\lambda}(\lambda)\tau_A(\lambda)\tau_o(\lambda)\rho_t(\lambda) d\lambda \quad (3.40)$$

Якщо об'єкт підсвічується джерелом у вигляді абсолютно чорного тіла з температурою T , то поверхнева щільність випромінювання такого джерела описується формулою Планка (2.18).

Спектральна щільність освітленості в площині зображення

$$E'_\lambda(\lambda) = \frac{\tau_A(\lambda)\tau_o(\lambda)\rho_t(\lambda)}{4k_{eff}^2} E_{\lambda_{max}} X(\lambda, T), \quad (3.41)$$

де $X(\lambda, T) = \frac{2,9081 \cdot 10^{19}}{(\lambda T)^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{14388}{\lambda T}\right) - 1}$ - відносна спектральна щільність світності

АЧТ.

Відповідно формулу для інтегральної енергетичної освітленості в площині зображення можна переписати у вигляді

$$E'_e = \int_0^\infty E'_\lambda(\lambda) d\lambda = \frac{E_{\lambda_{max}}}{4k_{eff}^2} \int_0^\infty X(\lambda, T) \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) \rho_t(\lambda) d\lambda. \quad (3.42)$$

Вираз для інтегрального енергетичного потоку випромінювання, що потрапляє на одиночний піксель МПВ, матиме вигляд

$$\Phi'_e = A_D E'_e = \frac{A_D E_{\lambda_{max}}}{4k_{eff}^2} \int_0^\infty X(\lambda, T) \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) \rho_t(\lambda) d\lambda. \quad (3.43)$$

де A_D - площа пікселя.

Потік випромінювання (3.43) викличе появу в потенційній ямі пікселя матриці N сигнальних електронів

$$N = t_i A_D \int_0^\infty \frac{E'_\lambda(\lambda) \eta(\lambda)}{E_b(\lambda)} d\lambda = t_i A_D \int_0^\infty E'_\lambda(\lambda) \frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{hc} d\lambda, \quad E_{ph}(\lambda) = \frac{\lambda}{hc}, \quad (3.44)$$

де $\eta(\lambda)$ - квантова ефективність ПВ; $E_{ph}(\lambda)$ - енергія фотона на довжині хвилі λ ; t_i - час накопичення; h - постійна Планка; c - швидкість світла у вакуумі.

Величина $\frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{hc}$ фактично є спектральною чутливістю ПВ

$$\frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{hc} = S(\lambda) = \frac{Max[\eta(\lambda) \cdot \lambda]}{hc} \frac{\eta(\lambda) \cdot \lambda}{Max[\eta(\lambda) \cdot \lambda]} = S_{max} \tilde{S}(\lambda). \quad (3.45)$$

де S_{max} - максимальне значення чутливості МПВ; $\tilde{S}(\lambda)$ - відносна спектральна чутливість МПВ.

Чутливість МПВ $S(\lambda)$ в даному випадку має розмірність $[Дж^{-1}]$, що відповідає кількості електронів що виникають у потенційній ямі при поглинанні 1 джоуля

променевої енергії. З останніх формул маємо

$$N = \frac{t_i A_D S_{\max} E_{\lambda \max}}{4k_{\text{eff}}^2} \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \tilde{S}(\lambda) \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) \rho_t(\lambda) d\lambda. \quad (3.46)$$

Сумарний рівень шуму N_n , що виникає при перетворенні сигналу в МПВ, складається з фотонного шуму потоку випромінювання від фону N_b і власних шумів ПВ і електронного тракту

$$N_n = \sqrt{N_b^2 + N_{\text{пасп}}^2}, \quad (3.47)$$

де $N_{\text{пас}}$ - паспортне значення СКВ шуму МПВ.

Фотонний шум є наслідком дискретної природи світла і підкоряється закону розподілу Пуасона. Згідно з цією статистикою, фотонний шум дорівнює квадратному кореню з числа сигнальних фотонів. Таким чином, відношення сигнал/шум в потоці фотонів, падаючому на піксель, буде також дорівнює кореню квадратному з числа фотонів. ПВ додатково погіршує відношення сигнал/шум за рахунок наявності власних шумів. Враховуючи, що за умовою розрахунку, кількість сигнальних електронів має дорівнювати значенню СКВ шумових електронів, отримуємо [92]

$$n = N_u = \sqrt{(\sqrt{n})^2 + N_{\text{пасп}}^2} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4N_{\text{пасп}}^2}}{2} \approx N_{\text{пасп}}. \quad (3.48)$$

Остаточно вираз для порогової величини спектральної щільності освітленості буде мати вигляд

$$NEI = E_{\lambda}^{\text{nop}} = \frac{4k_{\text{eff}}^2 N_u}{t_i A_D S_{\max} \int_0^{\infty} X(\lambda, T) \tilde{S}(\lambda) \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) \rho_t(\lambda) d\lambda}. \quad (3.49)$$

3.3.2 Еквівалентна шуму різниця температур

За визначенням $NETD$ відповідає ситуації, коли відношення сигнал/шум на виході ПВ є рівним одиниці: $\mu = \frac{u_s}{u_n} = 1$. Корисний сигнал від об'єкту виникає при

наявності температурного контрасту ΔT між об'єктом і фоном. Тест-об'єкт повинен мати кутові розміри, які у декілька разів перевищують кутовий розмір чутливої площадки ПВ, щоб нівелювати вплив просторового розділення на результати вимірювань. Для нівелювання впливу електронної системи використовують стандартний еталонний фільтр з передавальною функцією

$$H_{f,tp}(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^{-0,5}, \quad (3.50)$$

де $f_0 = 1/2t_o$; t_o – час розкладу одного елемента зображення.

Для розрахунку $NETD$ користуються рядом допущень [9, 91]:

- 1) Тест-об'єкт розташований на незначній відстані від ОЕСС. Тоді можна вважати, що випромінення мало поглинається при проходженні через атмосферу, тобто в робочому спектральному діапазоні $\tau_A(\lambda) \approx 1$;
- 2) Ефективна шумова смуга електронного тракту визначається за формулою

$$\Delta f = \frac{1}{NEP_{max}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} NEP(f) |H_{f,tp}(f)|^2 df, \quad (3.51)$$

де $NEP(f)$ – спектральна щільність потужності шуму; $H_{f,tp}(f)$ – передавальна функція еталонного фільтра, яка визначається формулою (3.50);

- 3) Тест-об'єкт великих розмірів розташований на рівномірному фоні і має температурний контраст ΔT . Тест-об'єкт і фон випромінюють як АЧТ [92].

Оскільки об'єкт завжди знаходиться на фоні, то корисний сигнал виникає при наявності температурного контрасту між об'єктом і фоном, тобто

$$u_s = u_{st} - u_{sb}, \quad (3.52)$$

де u_{st} і u_{sb} – сигнали, що утворені об'єктом і фоном відповідно.

Якщо об'єкт і фон є ламбертівськими випромінювачами, то сигнал становить

$$\begin{aligned} u_s &= \frac{1}{\pi} A_D \frac{A_p}{R^2} \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) [M_\lambda(\lambda, T + \Delta T) - M_\lambda(\lambda, T)] d\lambda = \\ &= \frac{1}{\pi} A_D \frac{A_p}{R^2} \tau_o \cdot \Delta T \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_D(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda, \end{aligned} \quad (3.53)$$

де τ_o – середній коефіцієнт пропускання ОС; $R_D(\lambda)$ - спектральна чутливість ПВ.

Відношення сигнал/шум на виході еталонного фільтра

$$\mu_f = \frac{U_s}{U_n} = \frac{1}{\pi} A_D \tau_o \frac{A_p}{d^2} \frac{\Delta T}{\sqrt{A_D \Delta f}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda. \quad (3.54)$$

Формулу для розрахунку $NETD$ знаходимо, вважаючи, що $\mu_f = 1$. Тоді

$$NETD = \Delta T = \frac{\pi R^2 \sqrt{A_D \Delta f}}{A_p \tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda}. \quad (3.55)$$

Отримана формула є найбільш загальною для розрахунку $NETD$. Враховуючи, що площа вхідної зіниці об'єктива дорівнює $A_p = \pi D_o^2 / 4$, а відношення площі об'єкта до квадрата відстані дорівнює відношенню площі ПВ до квадрата фокусної відстані $A_p / R^2 = A_D / f_o'^2$, маємо

$$NETD = \frac{4k_{eff}^2}{\tau_o \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda} \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}}. \quad (3.56)$$

В ОЕСС з МПВ крім шумів окремих пікселів необхідно враховувати геометричний шум матриці. В зв'язку з цим при визначенні $NETD$ розглядають наступні складові:

- 1) $NETD_{th}$, яка обумовлена тепловим шумом Джонсона і $1/f$ – шумом (власними шумами);
- 2) $NETD_{ph}$, яка обумовлена радіаційним (фотонним) шумом і визначає теоретично мінімальне значення $NETD$;
- 3) $NETD_g$, яка обумовлена геометричним шумом.

Якщо домінуючими є власні шуми ПВ, які визначаються питомою виявлювальною здатністю D^* , то для розрахунку $NETD$ використовують отримані вище формули.

Якщо переважає фотонний шум, то для розрахунку $NETD$ використовують формулу [47]

$$NETD_{ph} = \frac{4(1 + 4k_{eff}^2)}{\pi(dL_e / dT)} \sqrt{\frac{\varepsilon_b k \sigma_{SB} T_b^5 \Delta f}{A_D}}, \quad (3.57)$$

де k – постійна Больцмана; σ_{SB} – постійна Стефана – Больцмана.

Якщо переважає геометричний шум, то для розрахунку $NETD$ можна використати формулу [47]

$$NETD_g = k_{Dg} k_{gn} \lambda_0 T_b^2, \quad (3.58)$$

де $k_{Dg} = 0,694$ мкм/К – постійна; k_{gn} – відносна неоднорідність чутливості пікселів; λ_0 – середня довжина хвилі робочого спектрального діапазону, мкм.

Наприклад, якщо $k_{gn} = 0,001$, $\lambda_0 = 10$ мкм і $T_b = 300$ К, то $NETD_g = 63$ мК. Експериментальні дослідження свідчать про те, що для МПВ з $D^* > 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц}}$ /Вт межа температурного розділення визначається головним чином геометричним шумом.

Якщо при розрахунках ОЕСС сигнали і шуми подаються у квантовій формі, то [47]

$$NETD_{ph} = \frac{4(1 + 4k_{eff}^2) \sigma_q}{\pi A_D \int_0^\infty (dL_e / dT) T_b \tau_c(\lambda) \tau_0(\lambda) R_q(\lambda) d\lambda}, \quad (3.59)$$

де $\sigma_q, R_q(\lambda)$ - середнє квадратичне значення шуму і чутливість ПВ, виражені через число квантів випромінювання, що приходять на приймач в одиницю часу.

3.3.3 Мінімально виявлювальна різниця температур

Параметр $NETD$ достатньо повно характеризує енергетичну чутливість ТПВ каналів, але має ряд недоліків [9]: формула (3.57) є дійсною тільки для об'єктів великих розмірів і не враховує характеристики оператора ОЕСС.

$NETD$ визначає шуми на виході еталонного фільтра з ефективною шумовою смугою Δf , а $\bar{L}_{S,n} \Delta T$ – сигнал з врахуванням роздільної здатності ОЕСС. Для розрахунку відношення сигнал/шум, необхідно врахувати відмінність ефективної

шумової смуги ОЕСС, що враховує спектр потужності шумів ПВ $NPS(f)$ та МПФ електронного тракту $M_{El}(f)$ і монітора $M_M(f)$, від ефективної шумової смуги еталонного фільтра Δf . Тоді відношення сигнал/шум на екрані монітора буде [91]

$$\mu_s = \frac{\bar{L}_{S,n} \cdot \Delta T}{NETD} \left[\frac{\Delta f}{\int_0^\infty NPS(f) \cdot M_{El}^2(f) \cdot M_S^2(f) df} \right]^{0,5}. \quad (3.60)$$

Ймовірність виявлення зображення тест-об'єкта на екрані монітора залежить від суб'єктивного відношення сигнал/шум $\mu_E = \mu_d$. Враховуючи просторове та часове інтегрування в зоровій системі, відношення сигнал/шум, що сприймається оператором, дорівнює

$$\mu_E = \frac{\bar{L}_{S,n} \cdot \Delta T}{NETD} \left[\frac{\Delta f}{\int_0^\infty NPS(f) \cdot M_{El}^2(f) \cdot M_S^2(f) \cdot M_E^2(f) df} \right]^{0,5} \times (f_f t_E)^{0,5} \left(\frac{\xi_{tp}}{\beta_D} \right)^{0,5}, \quad (3.61)$$

де f_f – частота кадрів; $t_E = 0,2$ с – часова постійна ока.

Розв'язуючи рівняння (3.61) відносно ΔT , отримаємо загальну формулу для розрахунку $MDTD$

$$MDTD(\xi_{tp}) = \Delta T = \frac{NETD \cdot SNR_d}{\bar{L}_{S,n}} \left(\frac{\beta_D k_{\Delta f}}{f_f t_E \xi_{tp}} \right)^{0,5}, \quad (3.62)$$

де $k_{\Delta f}$ – коефіцієнт ширини смуги, який визначається формулою

$$k_{\Delta f} = \frac{\int_0^\infty NPS(f) M_{el}^2(f) M_M^2(f) M_E^2(f) df}{\Delta f}. \quad (3.63)$$

Для практичного розрахунку $MDTD$ отриману формулу (3.62) можна спростити, вважаючи що, по-перше, радіус кружка розсіювання об'єктива ОЕСС r_s є набагато меншим ніж розміри тест-об'єкта ξ_{tp}'' , тобто $\xi_{S,tp} = \xi_{tp}''$; по-друге, електронний тракт і монітор мають достатньо широкі ефективні шумові смуги пропускання порівняно із смугою зорової системи, тобто $M_{El}(f) \approx 1$ і $M_S(f) \approx 1$,

а шумовий сигнал ОЕСС у межах цих смуг є «білим», тобто $NPS(f) \approx 1$; по-третє, просторове інтегрування зорової системи уздовж координати сканування x здійснюється із узгодженою передаточною функцією, яка визначається розміром тест-об'єкта ξ_{tp}'' , тобто

$$M_E(v_x) = \frac{\sin(\pi \xi_{tp}'' v_x)}{\pi \xi_{tp}'' v_x} = \text{sinc}(\xi_{tp}'' v_x). \quad (3.64)$$

Тоді коефіцієнт ширини смуги дорівнює

$$k_{\Delta f} = \frac{\int_0^\infty \text{sinc}^2\left(\xi_{tp}'' \frac{t_o}{\alpha_D} f\right) df}{\Delta f}. \quad (3.65)$$

З урахуванням викладеного вище, формула (3.62) запишеться як

$$MDTD(\xi_{tp}) = \frac{NETD \cdot SNR_d}{\bar{L}_{S,n}} \left(\frac{\alpha_D \beta_D}{2 \xi_{tp}^2 t_o \Delta f \cdot f_f t_E} \right)^{0,5}. \quad (3.66)$$

Отримана формула показує залежність мінімальної виявлювальної різниці температур від кутових розмірів тест-об'єкта. Якщо шумова смуга монітора Δf є узгодженою з часом розкладу одного елемента, то $\Delta f \cdot t_o = \pi / 4$.

3.4 Мінімальна роздільна різниця температур

Зв'язок між просторовим і температурним розділенням встановлюється з допомогою функції мінімальної роздільної різниці температур $MRTD(v_x)$. Фактично ця функція є найбільш інформативною об'єктивною характеристикою ТПВ каналів і визначає залежність мінімальної виявлювальної різниці температур від просторової частоти тестової міри [168]. Вимірювання тест-міри (міри Фуко) виконуються, як правило, у напрямку x .

Отримаємо рівняння для розрахунку $MRTD$, використовуючи вдосконалений алгоритм, наведений в [169, 170]. Одним з дискусійних припущень Ллойда [9] є механізм просторової фільтрації зорової системою зображення міри Фуко на екрані монітора. Було запропоновано просторове інтегрування зоровою системою вздовж

координати сканування x враховувати узгодженою передавальною функцією, яка визначається кутовим розміром ξ''_{tp} зображення штриха міри на екрані монітора. При цьому МПФ зорової системи $M_E(\nu_x)$ апроксимується функцією (3.64).

На рисунку 3.3 показані графіки реальної МПФ зорової системи [171] і її апроксимації Дж. Ллойдом і Д. У. Шульцем (рівняння (3.64)) [107]

$$M_{E,S}(\nu_x) = 2,71[\exp(-0,11\nu_x) - \exp(-0,35\nu_x)], \quad (3.67)$$

де просторова частота ν_x має розмірність град^{-1} .

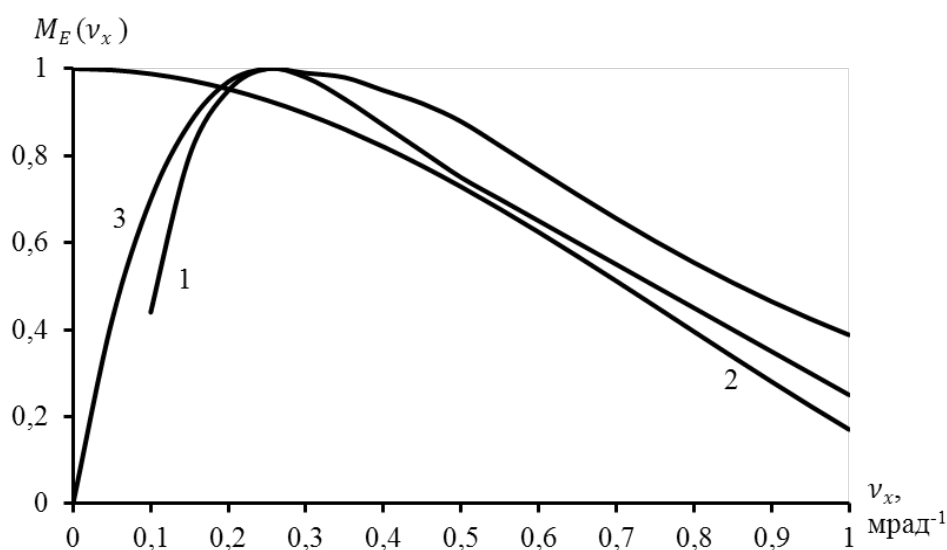


Рис. 3.3. МПФ зорової системи людини: 1 - експериментально отримана; 2 -

апроксимація (1), при $\xi''_{tp} = 0,85$ мрад; 3 - апроксимація (2)

Аналіз наведених графіків показує, що, по-перше, апроксимація Ллойда (3.64) значно відрізняється від реальної МПФ зорової системи, особливо на низьких просторових частотах; по-друге, апроксимація Шульца в значній мірі відповідає реальній МПФ зорової системи. Тому для отримання рівняння розрахунку $MRTD$ будемо використовувати апроксимацію Шульца (3.67). Одновимірний механізм зорового сприйняття зображення міри Фуко будемо враховувати через відношення сигнал / шум на виході еталонного фільтра

$$\mu_f \approx \frac{M_{tp,E\Delta T}}{NETD}, \quad (3.68)$$

де ΔT - температурний контраст міри Фуко; $M_{tp,E}$ - функція передачі контрасту ТПВ каналу.

Для описання тест-об'єкта замість $\bar{L}_{S,n}(\xi''_{tp})$ використовується МПФ усієї ОЕСС $M_s(v_x)$. Оскільки $M_s(v_x)$ визначена для синусоїдальної міри, а тест-об'єкт для визначення $MRTD$ є прямокутною мірою, то необхідно внести поправку на розклад Фур'є прямокутної міри. Амплітуда 1-ї гармоніки прямокутного сигналу в $4/\pi$ раз більше амплітуди синусоїдального сигналу того ж періоду і амплітуди. Додатково необхідно врахувати, що зорова система реєструє середню яскравість прямокутного штриха на фоні. Середнє значення за півперіод 1-ї гармоніки прямокутного сигналу в $2/\pi$ раз більше амплітуди. Звідси випливає, що МПФ ОЕСС з урахуванням сприйняття тест-об'єкта оком має такий вигляд [92]

$$M_{tp,E} = \frac{8}{\pi^2} M_s \quad (3.69)$$

З урахуванням цих зауважень, відношення сигнал/шум на екрані, що сприймається оператором, має вигляд

$$\mu_E = \frac{8}{\pi^2} \frac{\Delta T}{NETD} M_s(v_x) \xi_{tp} \sqrt{\frac{7 f_f t_E}{k_{\Delta f} \alpha_D \beta_D}}, \quad (3.70)$$

де f_f - частота кадрів; t_E - постійна часу зорової системи; ξ_{tp} - кутовий розмір штриха міри; $\alpha_D \times \beta_D$ - кутові розміри пікселя ПВ; $k_{\Delta f}$ - коефіцієнт ширини смуги, що показує відмінність реальної смуги пропускання ТПВ каналу з врахуванням зорового сприйняття від ефективної шумовий смуги еталонного фільтру.

Кутовий розмір зображення штриха ξ''_{tp} в просторі зображень зв'язано з кутовим розміром штриха ξ_{tp} в просторі предметів співвідношенням

$$\frac{\xi''_{tp}}{\xi_{tp}} = \frac{f'_o \beta_{el}}{R_{SE}}, \quad (3.71)$$

де f'_o - фокусна відстань об'єктива; β_{el} - електронне збільшення ТПВ каналу; R_{SE} - відстань між екраном і зоровою системою.

Кутові просторові частоти v_x в МПФ монітора і зорової системи v_x'' зв'язані з часовою частотою f співвідношеннями

$$v_x = \frac{t_o}{\alpha_D} f \text{ та } v_x'' = \frac{v_x}{\Gamma_s}, \quad (3.72)$$

де t_o - час формування одного елемента розкладу зображення, с; Γ_s - кутове збільшення ТПВ каналу.

Для практичного застосування виразу (3.70) спростимо його відповідно до рекомендацій Дж.Ллойда [9]: електронний блок і дисплей мають досить широкі ефективні смуги пропускання в порівнянні з пропускну здатністю зорової системи, об'єктива і ПВ, тобто $M_{el}(f) \approx 1$, $M_s(f) \approx 1$; шумовий сигнал в межах цієї смуги є «білим», тобто $NPS(f) \approx 1$. Тоді коефіцієнт ширини смуги з урахуванням (3.67) при кутовому збільшенні $\Gamma_s = 1$ буде мати вигляд:

$$k_{\Delta f, S} = \frac{7,34}{\Delta f} \int_0^{\infty} \left[\exp\left(-1,92 \frac{t_o}{\alpha_D} f\right) - \exp\left(-5,67 \frac{t_o}{\alpha_D} f\right) \right]^2 df. \quad (3.73)$$

Обчислення інтеграла (3.73) дає наступний результат:

$$k_{\Delta f, S} = \frac{7,34}{\Delta f} \frac{\alpha_D}{t_o} 0,138 \approx \frac{\alpha_D^*}{t_o \Delta f}, \quad (3.74)$$

де α_D^* - безрозмірна величина, що дорівнює кутовому розміру пікселя в мілірадіанах. Коефіцієнт ширини смуги за Дж. Ллойдом, визначається як:

$$k_{\Delta f, L} = \frac{\alpha_D}{2 \xi_{tp} t_o \Delta f}. \quad (3.75)$$

На рисунку 3.4 приведені графіки функцій (3.73) і (3.75) в залежності від кутових розмірів штриха міри. Аналіз графіків показує, що вони збігаються між собою, коли кутовий розмір штриха дорівнює $\xi_{tp} = 0,5$ мрад = 1,72 кут. мін.

Ймовірність розрізнення штрихів в зображенні міри Фуко залежить від сприйманого відношення сигнал/шум $\mu_r = \mu_E$. Наприклад, для ймовірності розпізнавання 90% необхідно, щоб $\mu_E = 4,5$. Якщо підставити це значення в формулу (3.70), то ΔT буде шуканої функцією $MRTD(v_x)$ просторової частоти v_x

$$\Delta T = MRTD(v_x) = \frac{\pi^2}{8} \mu_r \times NETD \frac{1}{M_s(v_x) \xi_{tp}} \sqrt{\frac{k_{\Delta f} \alpha_D \beta_D}{7 f f t_E}}. \quad (3.76)$$

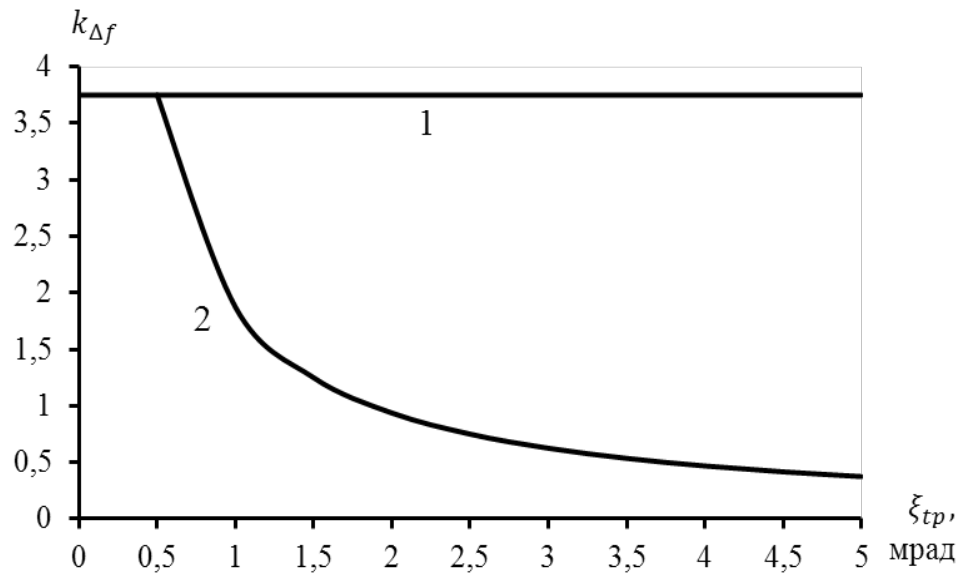


Рис. 3.4. Залежність коефіцієнта ширини смуги системи «ТПВ канал - зорова система» від кутового розміру ξ_{tp} штриха міри Фуко, коли $\alpha_D = 1,88$ мрад і $t_o \Delta f = 0,5$: 1 - для апроксимації Шульца; 2 - для апроксимації Ллойда

Підставимо (3.70) в (3.76) з урахуванням того, що просторова частота $\nu_x = 1/2\xi_{tp}$. Тоді $MRTD$ буде визначатися рівнянням

$$MRTD_S(\nu_x) = 0,93 \cdot \mu_r \cdot NETD \frac{\nu_x \alpha_D^*}{M_S(\nu_x)} \times \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}}. \quad (3.77)$$

У роботах [9, 91] було отримано подібне рівняння для розрахунку $MRTD$, в основі якого лежить апроксимація Дж. Ллойда МПФ зорової системи

$$MRTD_L(\nu_x) = 0,66 \cdot \mu_r \cdot NETD \frac{\nu_x}{M_S(\nu_x)} \times \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f \cdot t_o f_f t_E}}. \quad (3.78)$$

Аналіз рівнянь (3.77) і (3.78) показує, що за умови $\alpha_D^* = 0,71$ ці рівняння співпадають між собою.

Як приклад розрахуємо $MRTD$ тепловізора на базі передавальної камери Thermal Eye TSC, яка має такі характеристики: приймач випромінювання - мікроболометрична матриця розміром $p \times q = 160 \times 120$ пікселів; розмір пікселя $V_D \times W_D = 30 \times 30$ мкм²; температурна чутливість $NETD = 0,1$ К; фокусна відстань об'єктива $f_o = 16$ мм при відносному отворі 1:1; кутове поле зору $2(\omega_{ox} \times \omega_{oy}) = 17 \times 12$;

частота кадрів $f_f = 30$ Гц.

Функцію $MRTD_S(\nu_x)$ розрахуємо по формулі (3.77), де відомими є відношення сигнал/шум $\mu_r = 4,5$ (для ймовірності розрізнення штрихів міри 90% за критеріями Джонсона), а також $NETD = 0,1$ К; $f_f = 30$ Гц; $t_E = 0,2$ с.

Кутові розміри пікселя мікроболометричної матриці становлять

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f_o} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{16} = 1,87 \text{ мрад.}$$

При оптимальному узгодженні смуги пропускання Δf і часу t_o формування одного елемента розкладу зображення має місце співвідношення $\Delta f t_o = 0,5$.

МПФ ТПВ каналу $M_S(\nu_x)$ з високоякісним об'єктивом визначається розміром пікселя α_D ПВ

$$\alpha_D = \beta_D = \frac{V_D}{f_o} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{16} = 1,87 \text{ мрад,}$$

$$\text{тобто } M_S(\nu_x) \approx M_D(\nu_x) = \text{sinc}(\nu_x \alpha_D) = \frac{\sin(1,87\pi\nu_x)}{1,87\pi\nu_x}.$$

Після підстановки вихідних параметрів в рівняння (3.77) отримаємо функцію для розрахунку $MRTD$:

$$MRTD_S(\nu_x) = 0,93 \cdot 4,5 \cdot 0,1 \cdot 1,87\nu_x \left[\frac{1,87\pi\nu_x}{\sin(1,87\pi\nu_x)} \right] \times \sqrt{\frac{1,87^2}{0,5 \cdot 30 \cdot 0,2}} = 0,845\nu_x \left[\frac{1,87\pi\nu_x}{\sin(1,87\pi\nu_x)} \right].$$

Графіки $MRTD$ ТПВ каналу з передавальною камерою Thermal Eye TSC, побудовані за формулами (3.77) і (3.78), наведені на рисунку 3.5.

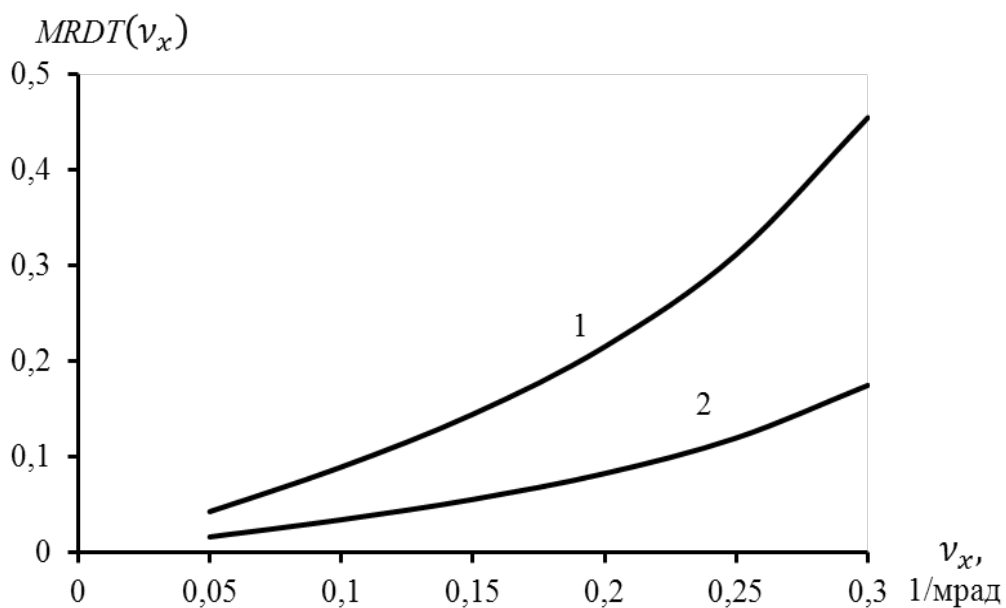


Рис. 3.5. $MRTD$ ТПВ каналу з камерою Thermal Eye TSC для апроксимацій зорової системи за Шульцем (3.67) та за Ллойдом (3.64)

Аналіз цих функцій показує, що значення функцій $MRTD_S(v_x)$ і $MRTD_L(v_x)$ відрізняються між собою в 2,6 рази, а функція м залежить від параметра α_D^* . При $\alpha_D^* = 0,71$ функції $MRTD_S(v_x)$ і $MRTD_L(v_x)$ збігаються між собою.

Отримані формули (3.77) і (3.78) мають ряд обмежень:

1. МПФ зорової системи визначається для випадку, коли розмір зображення штриха міри ω_{tp}'' перевищує кутове розділення ока.
2. Просторове інтегрування зорової системи припиняється, якщо $7\omega_{tp}'' > 40$ кут. хв.

Важливість функції $MRTD(v_x)$ як узагальненої характеристики ТПВ каналів полягає в тому, що вона визначає температурну чутливість на низькій просторовій частоті (для великих об'єктів) і просторове розділення на високих частотах. Але необхідно відмітити, що $MRTD$ не враховує характеристики реальних об'єктів та фонів. $MRTD$ визначає залежність температурного контрасту $\Delta T = T_t - T_b$ міри Фуко від її просторової частоти. Але ОЕСС сприймає не температурний контраст ΔT , а контраст енергетичної яскравості міри $\Delta L = L_t - L_b$. Згідно закону Стефана-

Больцмана для ламбертовського джерела випромінювання контраст яскравості міри дорівнює

$$\begin{aligned}\Delta L &= \frac{\sigma}{\pi} [T_t^4 - T_b^4] = \frac{\sigma}{\pi} [(T_b + \Delta T)^4 - T_b^4] = \\ &= \frac{\sigma}{\pi} [4T_b^3 \Delta T + 6T_b^2 \Delta T^2 + 4T_b \Delta T^3 + \Delta T^4],\end{aligned}\quad (3.79)$$

де $\sigma = 5,67023 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постійна Стефана-Больцмана.

З цього виразу випливає, що температура фону T_b впливає на визначення *MRTD*. Для малого температурного контрасту $\Delta T \ll T_b$ маємо

$$\Delta L \cong \frac{4\sigma}{\pi} T_b^3 \Delta T. \quad (3.80)$$

Звідси можна визначити температуру фону

$$T_{b0} = \sqrt[3]{\frac{\pi}{4\sigma}} = 240,16 \text{ К},$$

для якої температурний контраст ΔT дорівнює контрасту яскравості ΔL в $\text{Вт}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2)$.

Додаткові похибки у визначення *MRTD* вносять такі фактори:

- сприйняття зображення міри оператором є нелінійним процесом, що обумовлено, по-перше, тим, що зорове відчуття залежить від логарифму освітленості сітківки; по-друге, тим, що при точковому освітленні рецептора (колбочки) світлове відчуття спостерігається і в сусідніх рецепторах (ефект затримки). Це призводить до того, що око реагує сильніше на зображення смуги прямокутної форми (по краям), ніж на смугу синусоїдальної форми;

- МПФ зорового сприйняття залежить від кута поля зору ока;

- розділення зображення штрихових мір залежить від суб'єктивних особливостей зорового сприйняття оператора;

- період і просторова частота міри Фуко не відповідають періоду і частоті просторової вибірки в МПВ. В багатьох випадках не враховується випадкове взаємне положення зображення міри і періодичної структури МПВ [91].

Більш узагальненою характеристикою, що поєднує енергетичне і просторове розділення ОЕСС, є мінімальна роздільна різниця яскравості ($MRLD(v_x)$, Minimum Resolvable Luminance Difference), яку можна визначити як [133]

$$MRLD(v_x) = \frac{1}{\pi} \left[4\sigma T_b^3 \cdot MRTD(v_x) + \sigma T_b^4 (\varepsilon_t - \varepsilon_b) + \rho_t E_{0b} + E_{0s} (\rho_t - \rho_b) \right], \quad (3.81)$$

де $\varepsilon_t, \varepsilon_b$ і ρ_t, ρ_b – коефіцієнти випромінювання і відбиття поверхонь об'єкта і фона відповідно; E_{0b} – освітленість об'єкта фоном; E_{0s} – освітленість об'єкта і фона зовнішнім джерелом випромінювання.

3.5 Ймовірнісні оцінки

Виявлення сигналів на фоні шумів є ймовірнісним процесом і в алгоритмах обробки сигналів в автоматичних системах використовуються методи теорії ймовірностей. Тому для оцінки ефективності функціонування дистанційних ОЕСС часто використовуються ймовірнісні показники. Слід зважати також на те, що в сучасних дистанційних ОЕСС розпізнавання об'єктів також здійснюється як виявлення певних релевантних ознак, тобто фактично приводиться до задачі виявлення сигналів [92].

Ймовірність виявлення об'єкта - це ймовірність виділення сигналу від об'єкта на певному фоні. Неоднорідність фону і власні шуми МПВ можна розглядати як випадкові процеси (зазвичай - з нормальним законом розподілу). У цьому випадку ймовірність виявлення об'єкта є однозначною функцією відношення сигнал/шум на вході порогового пристрою, тобто ймовірністю того, що сигнал від об'єкта u_t в сумі з випадковим сигналом u_n перевищать деяке порогове значення u_{th} [92].

Виявлення ОЕСС - це видача рішення про наявність чи відсутність об'єкта в полі зору. За рахунок сканування або за допомогою модуляції випромінювання елементів ФЦО, що знаходяться в полі зору системи, перетворюється в одновимірну реалізацію випадкового процесу [92].

Така реалізація $Y=y(t)$ є комбінацією корисного сигналу $s(t)$ з сигналом фонові завади $n(t)$, якщо об'єкт пошуку знаходиться в межах поля зору ОЕСС),

або результатом дії тільки завади $n(t)$, якщо об'єкта в поле зору немає. У загальному випадку сигнал $s(t)$ і завада $n(t)$ є випадковими функціями часу. На практиці часто суміш сигналу з шумом є їх алгебраїчною сумою $y(t)=s(t)+n(t)$ [92].

Найбільш вживаними правилами вибору рішення є критерій максимуму апостеріорної ймовірності, критерій мінімуму середнього ризику (критерій Байеса), критерій максимуму правдоподібності, а також критерій Неймана-Пірсона. Причому останній критерій частіше за все використовують в ОЕСС. Правило, що базується на цьому критерії, забезпечує одержання максимальної величини умовної ймовірності правильного виявлення $P_{вияв}$ при заданій величині умовної ймовірності неправильної тривоги P_{xm} .

Правило вибору рішення, що використовує критерій Неймана-Пірсона, дозволяє максимізувати умовну ймовірність правильного виявлення $P_{вияв}$ при заданих значеннях числа $\bar{n}_{хт}$ хибних тривог в одиницю часу, або середнього часового інтервалу $\bar{t}_{хт}$ між хибними тривогами, або імовірності $P_{xm}(t_p)$ виникнення хибної тривоги на заданому відрізку часу t_p роботи системи виявлення.

У більшості дистанційних ОЕСС застосовується найпростіший випадок виявлення сигналу методом одноразового відліку. Суть методу полягає в тому, що в деякий момент часу t_i береться єдиний відлік $y(t_i) = y_i$ реалізації $y(t)$, який і надходить на вхід порогового пристрою. За цим відліком необхідно прийняти рішення, присутній об'єкт виявлення в поле зору ОЕСС в момент t_i чи ні [92].

Настройку порогового пристрою виконують з врахуванням порогового значення відношення правдоподібності Λ_n

$$y_n = (\sigma^2 \ln \Lambda_n + 0,5a_i^2) / a_i, \quad (3.84)$$

де a_i - поточне значення сигналу; σ^2 - дисперсія шуму. При $y_i > y_n$ видається рішення «Так»; при $y_i < y_n$ - рішення «Ні».

При цьому відліки формуються безперервно і пропуск сигналу, викликаний дискретністю відліків, відсутній.

Умовна ймовірність хибної тривоги дорівнює

$$P_{i0} = 1 - L(p(\ln \Lambda_n + 0,5\mu)), \quad (3.85)$$

де $\mu = a_{\max}^2 / \sigma^2$ - відношення сигнал/шум; $L(p(u))$ - інтеграл ймовірностей Лапласа.

Оскільки $P_d = 1 - P_{0t}$, то формула для умовної ймовірності правильного виявлення може бути записана у вигляді

$$P_d = 1 - L(p[(\ln \Lambda_{\pi} - 0,5\mu)/\sqrt{\mu}]). \quad (3.86)$$

Виключаючи з рівнянь (3.85) і (3.86) величину μ , отримаємо формулу для розрахунку Λ_{π} , відповідного критерію Неймана-Пірсона:

$$\Lambda_{\pi} = \exp\{0,5 \{ [L(p^{-1}(1 - P_{t0}))]^2 - 0,5[L(p^{-1}(1 - P_d))]^2 \}, \quad (3.87)$$

де $L(p^{-1}(u))$ - аргумент u функції Лапласа.

Якщо з (3.85) і (3.86) виключити Λ_{π} , то можна отримати відношення сигнал/шум

$$\mu = [L(p^{-1}(1 - P_{t0})) - L(p^{-1}(1 - P_d))]^2. \quad (3.88)$$

Для візуальних спостережень часто використовують емпіричну модель, що враховує залежність ймовірності виявлення об'єкта, що перебуває в кутовому полі зору ОЕСС, від часу спостереження t [172]

$$P_d(t) = P_{\infty} \{1 - \exp[-(t - t_d)/\tau]\}, \quad (3.89)$$

де P_{∞} - ймовірність виявлення для нескінченно великого часу спостереження, усереднена для досить великої кількості спостерігачів; τ - постійна часу експонентної залежності, що відповідає 0,63 усталеного значення; t_d - час фіксації виявлення об'єкта спостерігачем [172].

Експериментальні дослідження, проведені лабораторією нічного бачення та електронних датчиків армії США (NVESD), дозволили рекомендувати такі формули для визначення τ у випадку помірно складного фону [173, 174]:

$$\tau = 3,0 - 2,2P_{\infty}.$$

При збільшенні складності строкатого фону

$$\tau = 4,0 - 2,65P_{\infty}.$$

Тобто постійна часу τ процесу виявлення збільшується на близько 0,5 с для великих і 1 с для маленьких P_{∞} .

Ця модель є занадто спрощеною і не враховує характеристик фону, полів зору тощо.

Ймовірність виявлення цілі через КП можна розрахувати за формулою [175]

$$P_1(t) = \left[1 - \exp \left(- \left[\frac{4}{\omega - 4} \right]^2 \right) \right] \left[1 - \exp \left(- \frac{\alpha (C / [1 + q])^2 \gamma^3 (\tau B)^{0,3} t}{(2\beta)^2} \right) \right], \quad (3.90)$$

де ω - кутова швидкість цілі; C - контраст об'єкта з фоном, який має яскравість B ; τ_0 - коефіцієнт пропускання ОС; 2β - поле зору ОС.

3.6 Споживчі характеристики ефективності

Основними споживчими суб'єктивними показниками ефективності ОЕСС є максимальна дальність виявлення та максимальна дальність розпізнавання об'єкта із заданими ймовірностями виявлення та розпізнавання. Ці характеристики залежать від просторової роздільної здатності; енергетичної роздільної здатності; функції передачі сигналу; передавальної функції; освітленості, еквівалентної шуму; еквівалентної шуму різниці температур; мінімальної виявлювальної різниці температур; мінімальної роздільної різниці температур; спектрального робочого діапазону; динамічного діапазону тощо [92].

Максимальна дальність виявлення – це максимальна дальність між ОЕСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт виявляється на екрані монітора із заданою ймовірністю у разі необмеженого часу спостереження. Максимальна дальність розпізнавання – це максимальна дальність між ОЕСС і стандартним тест-об'єктом, за якої тест-об'єкт розпізнається на екрані монітора із заданою ймовірністю у разі необмеженого часу спостереження [92]. Незважаючи на свою інтуїтивну зрозумілість показники дальності все ж таки є досить інтегральними і вторинними відносно інших характеристик ОЕСС. Розрахунки дальностей виконуються в рамках різних математичних моделей, основні з яких розглянуто в розділі 2.

До основних споживчих характеристик коліматорних та телескопічних прицілів відносять [30]: масо-габаритні (довжина, ширина, висота), ергономічні (діаметр вихідної зіниці, віддалення вихідної зіниці, яскравість фона, на якому можна спостерігати прицільну сітку з заданим контрастом, збільшення (для

телескопічних систем)), експлуатаційні (похибка кутового положення лінії прицілювання, надійність, яку доцільно визначати кількістю оптичних елементів в конструкції).

Тоді зіставлення різних типів оптичних схем прицілів можна здійснювати виходячи з нормованої комплексної характеристики, що складається з вищезгаданих часткових показників якості. За даною методикою було виконано порівняння розповсюджених схем коліматорних та телескопічних прицілів в розділі 1.2.2.

3.7 Оцінювання ефективності комплексування зображень в ОЕСС

Виходячи з великої кількості факторів, які впливають на ефективність ОЕСС, задача аналізу різних алгоритмічних рішень комплексування зображень в ОЕСС є складною [176 - 179] і має добре корелюватись із суб'єктивним сприйняттям зображень.

Оцінка адекватності об'єктивних показників якості комплексованих зображень їх суб'єктивному сприйняттю виконувалась методом суб'єктивних експертиз. В них брали участь 12 спостерігачів віком від 18 до 25 років з нормальним зором (еметропія). Всі спостерігачі мали досвід дешифрування тепловізійних зображень.

Зображення були отримані двоканальною ОЕСС у складі ТВ каналу (ПЗЗ камера РІН-750А) та ТПВ каналу (камера Thermal-eye). ТВ та ТПВ зображення були попиксельно зареєстровані методом контрольних точок [180].

Для комплексування інформації були застосовані методи без багатомасштабного розкладу: метод усереднення, метод головних компонент; та методи з багатомасштабним розкладом: піраміда Лапласа, градієнтна піраміда, морфологічна піраміда, контрастна піраміда, піраміда ФВП (фільтрування-віднімання-проріджування), вейвлет перетворення, інваріантне до зсувів вейвлет перетворення.

Методи з багатомасштабним розкладом виконувались на рівні 4 з об'єднанням низьких частот методом усереднення та об'єднанням високих частот методом максимуму.

В суб'єктивній експертизі зображення форматом 160×120 пікселів (оригінальні ТВ й ТПВ, а також комплексовані) почергово виводились на рідкокристалічний монітор LG FL 1730s. Рівень зовнішнього освітлення був сталим і становив 30 лк. Дистанція спостереження обиралась кожним спостерігачем індивідуально. Час спостереження не обмежувався. Об'єктом була людина. Задача спостерігачів полягала у виявленні об'єкта та визначенні її місцезнаходження, а також у розрізненні номера авто.

При об'єктивній оцінці якості комплексування були використані стандартне відхилення зображень [181], інформаційний показник, оцінка анізотропії зображень, $Q^{AB/F}$ [130, 131].

Стандартне відхилення зображення розміром $N \times M$ визначалось як

$$SD = \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (C_f(i, j) - \bar{m})^2}, \quad (3.91)$$

де $C(i, j)$ – інтенсивність (i, j) пікселя, \bar{m} – середнє значення всіх пікселів зображення.

Інформаційний показник якості зображення визначають за формулою

$$M_C^{AB} = \frac{I_{C,A} + I_{C,B}}{2}, \quad (3.92)$$

де кількість інформації, яка міститься в результуючому зображенні C із вхідних зображень A і B визначається відповідно як

$$I_{C,A} = p_{CA} \cdot \log \frac{p_{CA}}{p_C \cdot p_A}, \quad (3.93)$$

$$I_{C,B} = p_{CB} \cdot \log \frac{p_{CB}}{p_C \cdot p_B}, \quad (3.94)$$

де p_{CA} , p_{CB} – спільний розподіл яскравості, а p_A , p_B – незалежні розподіли.

Оцінку анізотропії зображення виконують на основі ентропії Ренні [182]. Спочатку для зображення знаходять розподіл Вігнера

$$W_z[n, k] = 2 \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} z[n+m] z^*[n-m] e^{-2i(2nm/N)k}, \quad (3.95)$$

де n і k – часова та частотна дискретні змінні відповідно, m – параметр зсуву; $z[n]$ – одномірний масив, що містить інформацію про інтенсивність N пікселів зображення в заданому напрямку.

Повний розподіл Вігнера знаходять шляхом зсуву вікна розміром в N пікселів в усіх можливих напрямках по зображенню. Після нормалізації розподіл Вігнера ототожнюють з розподілом ймовірності \tilde{P}_n і ентропію Ренні розраховують за формулою

$$R_3[n] = -\frac{1}{2} \log_2 \left(\sum_{k=1}^N \tilde{P}_n^3[k] \right). \quad (3.96)$$

Після формалізації отримують ентропію Ренні

$$\bar{R}[t, \theta_s] = \sum_n R_3[n, \theta_s] / M, \text{ де } \theta_s \in [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_S] - S \text{ орієнтацій, взятих для}$$

визначення ентропії, а M – розмір зображення.

Тоді показник анізотропії зображення визначають як

$$\sigma(t) = \sqrt{\sum_{s=1}^S (\mu_t - \bar{R}(t, \theta_s))^2 / S}, \quad (3.97)$$

де μ_t – середнє значення $\bar{R}[t, \theta_s]$, $\mu_t = \sum_{s=1}^S \bar{R}(t, \theta_s) / S$.

Показник Петровіка ($Q^{AB/F}$) вказує, яку частку інформації про контури перенесено із вхідного зображення в результуюче. Для того, щоб отримати інформацію про інтенсивність контуру $g(n, m)$ та його напрямку $\alpha(n, m)$ для кожного пікселя вхідного та результуючого зображення $p(n, m)$, $1 \leq n \leq N$ і $1 \leq m \leq M$ використовують оператор Собеля.

Зміни інтенсивності та напрямку $G^{AF}(n, m)$ і $A^{AF}(n, m)$ вхідного зображення A відносно результуючого F визначають за формулою

$$G^{AF}(n, m) = \begin{cases} \frac{g_F(n, m)}{g_A(n, m)}, & \text{якщо } g_A(n, m) > g_F(n, m) \\ \frac{g_A(n, m)}{g_F(n, m)}, & \text{в інших випадках} \end{cases}, \quad (3.98)$$

$$A^{AF}(n, m) = \frac{|\alpha_A(n, m) - \alpha_F(n, m)| - \pi / 2}{\pi / 2}.$$

Ці величини використовують для визначення коефіцієнтів збереження інформації про інтенсивність та напрям контуру

$$Q_g^{AF}(n, m) = \frac{\Gamma_g}{1 + e^{K_g(G^{AF}(n, m) - \sigma_g)}}, \quad Q_\alpha^{AF}(n, m) = \frac{\Gamma_\alpha}{1 + e^{K_\alpha(A^{AF}(n, m) - \sigma_\alpha)}}. \quad (3.99)$$

Константи $\Gamma_g, k_g, \sigma_g, \Gamma_\alpha, k_\alpha, \sigma_\alpha$ визначають точну форму сігма-функції, що використовується для визначення інтенсивності та напрям контурів.

Тоді загальний коефіцієнт збереження інформації про контур

$$Q^{AF}(n, m) = Q_g^{AF}(n, m) Q_\alpha^{AF}(n, m), \quad 0 \leq Q^{AF}(n, m) \leq 1.$$

Показник якості розраховуємо за формулою

$$Q^{AB/F} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M Q^{AF}(n, m) w^A(n, m) + Q^{BF}(n, m) w^B(n, m)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (w^A(i, j) + w^B(i, j))}, \quad (3.100)$$

де $w^A(i, j)$ і $w^B(i, j)$ – вагові коефіцієнти:

$$w^A(i, j) = [g_A(n, m)]^L, \quad w^B(i, j) = [g_B(n, m)]^L, \quad \text{де } L - \text{константа.}$$

Двоканальною ОЕСС в умовах сутінок було отримано 3 серії зображень. На рис. 3.6 показано одну серію зображень. Як видно із рисунка, на тепловізійному зображенні чітко видно людину біля автомобіля, але відсутня інформація про об'єкти в салоні автомобіля. На ТВ зображенні чітко видно людину в салоні автомобіля, а також можна розрізнити номер авто.



Телевізійне



Тепловізійне

Рис.3.6. Зареєстровані зображення

Комплексовані зображення представлені на рисунку 3.7.



метод усереднення

метод ГОЛОВНИХ
КОМПОНЕНТ

піраміда Лапласа

контрастна
піраміда

градієнтна піраміда



морфологічна піраміда



піраміда ФВП



вейвлет перетворення

інваріантне до зсувів
вейвлет перетворення

Рис. 3.7. Комплексовані зображення, отримані за допомогою різних методів комплексування

Як видно із рисунка, комплексування зображень дозволяє виявити обидва об'єкти. В залежності від використаного методу комплексування якість результуючого зображення буде різною. Згідно оцінок спостерігачів інваріантне до зсувів вейвлет перетворення, дискретне вейвлет перетворення та піраміда Лапласа дають зображення кращої якості в порівнянні з іншими методами: на зображеннях чітко видно і об'єкт, і його місце знаходження. Градієнтна піраміда та піраміда ФВП дають подібні зображення, але вони є дещо розмитими. Морфологічна піраміда дозволяє зберегти контраст та важливі деталі зображень, але результат має деякі артефакти (темні смуги в районі бампера та лобового скла автомобіля). Метод усереднення та метод головних компонент призводять до втрати контрасту результуючого зображення в порівнянні з вхідними, крім того метод головних компонент призводить до втрати інформації про об'єкт в автомобілі. Найгірші результати демонструє контрастна піраміда (додає шум в результуюче зображення, призводить до спотворення деяких фрагментів).

Таким чином, найкращі результати дають інваріантне до зсувів вейвлет перетворення, дискретне вейвлет перетворення та піраміда Лапласа. За ними слідує піраміда ФВП та градієнтна піраміда; потім морфологічна піраміда, метод усереднення, метод головних компонент, та контрастна піраміда.

Оцінки якості результуючого зображення (після комплексування) за допомогою об'єктивних показників наведено в таблиці 3.1.

Як видно із таблиці, найбільше співпадає із суб'єктивною оцінкою показник $Q^{AB/F}$. Зазвичай спостерігачі обирають наступні методи комплексування: інваріантне до зсувів вейвлет перетворення та піраміду Лапласа, і показник $Q^{AB/F}$ дає найбільші значення для цих двох методів. Досить непогано із суб'єктивною оцінкою співпадає оцінка анізотропії зображень. Інформаційний показник та стандартне відхилення лише в деяких випадках співпадають з оцінкою спостерігачів.

Для задачі виявлення об'єкта в сутінках згідно оцінок експертів доцільно використовувати такі методи комплексування як інваріантне до зсувів вейвлет перетворення, дискретне вейвлет перетворення та піраміду Лапласа. Для

об'єктивної оцінки якості результату комплексування доцільно використовувати показник $Q^{AB/F}$.

Таблиця 3.1

Оцінка якості результуючого зображення

Метод комплексування	Стандартне відхилення	Інформаційний показник	$Q^{AB/F}$	Анізотропія
Метод усереднення	16,3262	4,9695	0,4466	0,0041
Метод головних компонент	33,4028	6,9161	0,6639	0,0044
Піраміда Лапласа	24,7495	2,5621	0,7829	0,0150
Контрастна піраміда	27,0023	2,2142	0,2145	0,0140
Градiєнтна піраміда	18,6086	3,0349	0,7321	0,0112
Морфологічна піраміда	27,8245	3,6834	0,7939	0,0234
Піраміда ФВП	18,6043	3,0245	0,7322	0,0051
Вейвлет перетворення	21,6505	2,2105	0,7462	0,0154
Інваріантне до зсувів вейвлет перетворення	21,6919	2,3673	0,7442	0,0089

Нажаль, як видно із розгляду, у вживаних показниках якості комплексування відсутні ознаки фізичних процесів, які формують зображення. Тобто використання цих показників, на відміну від характеристик ефективності інформаційних каналів, в моделюванні процесів перетворення сигналів в системі «ФЦО – ОЕСС – оператор» є недоцільним або неможливим.

3.8 Новітній метод оцінки ефективності ОЕСС на основі показника успішності виконання завдання

Однією з найдосконаліших розрахункових моделей окремих каналів ОЕСС є модель Night Vision Integrated Performance Model, що використовується армією США. В її основу покладено показник успішності виконання завдання (*TTP* – Targeting Task Performance metric), який в загальному випадку має вигляд [183]

$$TTP = \left[\int_{\nu_{x\min}}^{\nu_{x\max}} \int_{\nu_{y\min}}^{\nu_{y\max}} \frac{C_R(\nu_x, \nu_y) M_s(\nu_x, \nu_y)}{CTF_E(\nu_x, \nu_y)} d\nu_x d\nu_y \right]^{1/2}, \quad (3.101)$$

де ν_x, ν_y – горизонтальна та вертикальна просторова частота в мрад⁻¹; $C_R(\nu_x, \nu_y)$ – просторовий спектр зображення; $M_s(\nu_x, \nu_y)$ – МПФ інформаційної системи за виключенням зорової системи; $CTF_E(\nu_x, \nu_y)$ – функція порогового контрасту (ФПК) зорової системи. Межі інтегрування $[\nu_{x\min}, \nu_{x\max}]$, $[\nu_{y\min}, \nu_{y\max}]$ задані діапазоном, де ФПК не перевищує сигнал.

Очевидно, що у порівнянні з моделями, заснованими на використанні критеріїв Джонсона, дана модель є більш повною й адекватною завдяки врахуванню поведінки ОЕСС не тільки на перетині МПФ та ФПК системи, але й на всьому частотному проміжку до точки перетину. Функція $C_R(\nu_x, \nu_y)$ в (3.101) є перетворенням Фур'є від зображення об'єкта на дисплеї по відповідній координаті. В стандартній розрахунковій моделі NVIPM для визначення показника TTP автотранспорту, військової техніки тощо використовується стале значення функції $C_R(\nu_x, \nu_y) = \text{const}$. Це обумовлено необхідністю уніфікації вихідних умов для порівняння ефективності ОЕСС при спостереженні різних видів об'єктів, які можуть суттєво відрізнятись один від одного.

В [184] запропоновано використовувати показник TTP для оцінки якості багатоканальних ОЕСС з комплексуванням зображень. Для методів без багатомасштабного розкладу використовується безпосередньо формула (3.101). Причому в формулу підставляється функція просторового спектру комплексованого зображення. Для методів з перетворенням масштабу показник TTP визначається на кожному рівні розкладу. Тобто діапазон просторових частот, спільний для декількох каналів двоканальної (або багатоканальної) ОЕСС, розбивається на піддіапазони (октави) відповідно до кількості рівнів розкладу зображень та розраховується значення показника в кожному піддіапазоні

$$TTP_c = \sum_l (TTP_{1,l} \cdot R_{1,l} + TTP_{2,l} \cdot R_{2,l} + \dots + TTP_{k,l} \cdot R_{k,l}), \quad (3.102)$$

де $TTP_{k,l}$ – показник успішності виконання завдання k -го зображення l -тої октави; $R_{k,l} = r_{k,l}^F \cdot \prod_k (1 - |r_{k,l}|)$ – коефіцієнт пропорційності; $r_{k,l}$ – кореляція Пірсона між вхідними зображеннями; $r_{k,l}^F$ – кореляція Пірсона між комплексованим та k -им вхідним зображенням.

В двовимірному випадку показник TTP є середнім геометричним горизонтальної ($TTPH$) та вертикальної ($TTPV$) складових

$$TTP = \sqrt{TTPH \cdot TTPV}. \quad (3.103)$$

Кожна складова є інтегралом відношення сигналу до ФПК системи в діапазоні всіх просторових частот $[f_{\min}, f_{\max}]$, де ФПК не перевищує сигнал [183]

$$TTPH = \int_{f_{x\min}}^{f_{x\max}} \left(\frac{C_R(f_x)}{CTF_s(f_x)} \right)^{1/2} df_x, \quad (3.104)$$

$$TTPV = \int_{f_{y\min}}^{f_{y\max}} \left(\frac{C_R(f_y)}{CTF_s(f_y)} \right)^{1/2} df_y, \quad (3.105)$$

де f_x – горизонтальна просторова частота в мрад⁻¹; f_y – вертикальна просторова частота в мрад⁻¹; $CTF_s(f_x)$, $CTF_s(f_y)$ – горизонтальна та вертикальна складові ФПК системи відповідно; C_R – перетворення Фур'є від зображення об'єкта на дисплеї.

Кореляцію Пірсона між комплексованим зображенням та вхідними розраховуємо за формулою [185]

$$r_{k,l}^F = \frac{\sum_m \sum_n (F_{k,l} - \overline{F_{k,l}})(L_{k,l} - \overline{L_{k,l}})}{\sqrt{\sum_m \sum_n (F_{k,l} - \overline{F_{k,l}})^2 \sum_m \sum_n (L_{k,l} - \overline{L_{k,l}})^2}}, \quad (3.106)$$

де $F_{k,l}$ – матриця значень яскравості комплексованого зображення в l -тій октаві просторової частоти; $L_{k,l}$ – матриця значень яскравості k -го вхідного зображення

в l - тій октаві просторової частоти; $\overline{L_{k,l}}$ – усереднене значення яскравості зображення в октаві.

Кореляцію Пірсона між вхідними зображеннями знаходимо по аналогії з $r_{k,l}^F$.

ФПК ОЕСС при наявності шумів монітора можна визначити наступним чином [186]

$$\Phi PK_S(f_x) = \frac{\Phi PK_E(f_e)}{МПФ_M(f_x) M_O(f_x) M_D(f_x)} \left(1 + \frac{\alpha^2 \sigma^2 QH_{гор}(f_x) QV_{гор}}{L^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.107)$$

де $\Phi PK_E(f_e)$ – ФПК ока спостерігача при спостереженнях з екрану; f_e – просторова частота на сітківці; $M_O(f_x)$, $M_D(f_x)$, $МПФ_M(f_x)$ – МПФ оптичної системи, матричного приймача випромінювання (МПВ) та монітора відповідно; $QH_{гор}(f_x)$ – горизонтальна та $QV_{гор}$ – вертикальна шумові смуги для одномірної синусоїдальної тестової міри; σ – середнє квадратичне значення шуму монітора; α – коефіцієнт пропорційності; L – середня яскравість монітора.

Складові формули (3.107) можна визначати у різні способи, наприклад, МПФ оптичної системи, вважаючи, що вона є дифракційно обмеженою, знаходимо за формулою, наведеною в [133], МПФ МПВ та монітора – [133], МПФ ока – [134], ФПК ока – [187], шумові смуги – [186].

Показник успішності виконання завдання TTP для ОЕСС з комплексуванням визначається по результуючому зображенню в залежності від методу злиття зображень.

Ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта в ОЕСС з комплексуванням можна розрахувати за відомою формулою [183]

$$P_z(R) = \frac{\left(\frac{V_k(R)}{V_{50}} \right)^{E(R)}}{1 + \left(\frac{V_k(R)}{V_{50}} \right)^{E(R)}}, \quad (3.108)$$

де $V_k(R) = \frac{\sqrt{A} \cdot TTP_k}{R}$ – число пар штрихів, що розміщуються на об'єкті; TTP_k –

показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням; A – площа об’єкта; R – відстань від об’єкта до ОЕСС; V_{50} – число штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50 % ймовірності правильного рішення залежно від змісту задачі; $E(R) = 1,51 + 0,24[V_k(R)/(V_{50})]$ – емпірично визначена константа, що залежить від спектрального діапазону та відношення $V_k(R)/V_{50}$.

Даний метод обрахунку якості комплексування в ОЕСС повністю є сумісним з лінійною моделлю ОЕСС, яка описана в розділі 2. Різниця полягає в його апостеріорності, тобто в тому, що обчислюються вже оброблені кінцеві зображення і для цього використовуються числові методи. Можна відмітити, що запропонований метод є схожим на розрахунок показника TTP з використанням SOM (Specific Object Model) моделі, [188], яка при однотипних об’єктах (наприклад, для друкованих літер, облич) дає більш достовірні результати прогнозування ймовірнісних характеристик виявлення, розпізнавання та ідентифікації з врахуванням просторового спектру об’єкта.

Висновки до розділу 3

1. Досліджено часткові та узагальнені показники якості ТВ та ТПВ каналів і запропоновано уніфікований алгоритм оцінювання просторових й енергетичних властивостей каналів для визначення ефективності спостереження в інформаційних каналах. Такий єдиний підхід дозволяє визначати основний інформаційний канал в ОЕСС як базовий для подальшого комплексування.

2. Виконано аналіз загальноживаних показників якості комплексування зображень на прикладі оцінювання зображення з двоканальної ОЕСС. Показано, що безпосереднє використання цих показників в моделюванні процесів перетворення сигналів в системі «ФЦО – ОЕСС – оператор» є недоцільним або неможливим внаслідок відсутності в них характеристик фізичних процесів, які формують зображення.

2. Розроблено новий метод оцінювання ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням інформації на основі апостеріорного показника успішності

виконання завдання TTP , який визначається чисельно для даного способу злиття зображень по результуючому просторовому спектру. Цей метод є сумісним з лінійною математичною моделлю «ФЦО – ОЕСС – оператор» і дозволяє не тільки дослідити особливості проходження сигналу через всі ланки інформаційного комплексу, але й особливості процесу комплексування зображень та його зорового сприйняття оператором, дає можливість розрахувати ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта в ОЕСС з комплексуванням.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДОЛОГІЯ УЗГОДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛІВ ОЕСС

Основними блоками ОЕСС, що в першу чергу визначають ефективність всієї інформаційної системи, є об'єкти та блок ПВ. Узгодженість їх характеристик є необхідною вимогою для того, щоб задача спостереження була виконана найкращим чином. Очевидно, що процес узгодження залежить від змісту поточної задачі, характеристик ФЦО, умов спостереження [189].

З огляду на велике розмаїття об'єктів, фонів і умов спостереження, неможливо створити універсальну апаратуру, параметри і характеристики якої найкращим чином задовольняли б будь-яких споживачів кінцевої інформації, тим більше, що такими споживачами, як правило, є спостерігачі і їх оцінки якості інформації є суб'єктивними. З іншого боку є очевидним, що для вузького класу задач можна оптимізувати основні характеристики блоків ОЕСС, якщо існують засоби об'єктивних оцінок таких характеристик. Наприклад, для ОЕСС спеціального призначення такими споживчими оцінками якості функціонування можуть бути дальність спостереження при заданій ймовірності виконання зорової задачі, точність прицілювання тощо.

Метою даного розділу є розроблення методів узгодження основних параметрів головних блоків ОЕСС для досягнення максимальної ефективності за критеріями, що витікають із призначення системи та поточної задачі спостереження – виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів, прицілювання.

4.1 Узгодження приймальних блоків спектральних каналів

Найбільшої ефективності ОЕСС досягає, коли узгодженими між собою є як спектральні канали, так і основні блоки в межах одного каналу. Процедура узгодження може бути універсальною з огляду на те, що задачами спостереження в будь-якому випадку є виявлення, розпізнавання та ідентифікація об'єктів певного класу.

4.1.1 Узгодження елементів вхідного блоку в межах спектрального каналу

Розглянемо застосування розробленої в розділі 2 моделі формування сигналу спектральним каналом дистанційної ОЕСС для узгодження параметрів основних елементів вхідного блоку системи [190]. Узгодженню підлягають параметри, які визначають просторові та енергетичні характеристики ОЕСС.

Сонце створює на поверхні Землі спектральну освітленість $E_{0\lambda}$. Об'єкт спостереження з коефіцієнтом відбиття ρ_t розміщено на фоні земної поверхні, яка характеризується альбедо ρ_b . Об'єкт і фон відбивають сонячне випромінювання за законом Ламберта. Випромінювання після відбиття від земної поверхні, на якій розміщено об'єкт спостереження, проходить через атмосферу і потрапляє в ОС ТВ каналу.

Яскравість об'єкта L_t і фону L_b в робочому спектральному діапазоні ($\lambda_1 \dots \lambda_2$) описується формулами (2.4), а корисний сигнал формується за рахунок відмінності відбиваючої здатності поверхонь об'єкта і фону і визначається формулою (2.5)

$$\Delta L_e = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [\rho_t(\lambda) - \rho_b(\lambda)] E_{0\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (4.1)$$

Вважатимемо, що інтегральна освітленість поверхні Землі становить $E_0 = 2,4 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² при інтегральному коефіцієнті пропускання атмосфери $\tau_A = 0,5$.

Оптична система складається із двох елементів: головного об'єктива та світлофільтра (необов'язково). Основними характеристиками об'єктива є:

- фокусна відстань f'_o ;
- відносний отвір D_p / f'_o (або ефективне діафрагмове число $k_{eff} = f'_o / D_p$), де D_p – діаметр вхідної зіниці;
- поле зору – кутове $2\omega_0$, або лінійне у просторі предметів (на поверхні Землі) $X \times Y$, або лінійне у просторі зображень (в площині МПВ) $X' \times Y'$;

- модуляційна передавальна функція (МПФ) $M_o(v_x, v_y)$;
- робочий спектральний діапазон з урахуванням світлофільтра $(\lambda_1 \dots \lambda_2)$;
- спектральний $\tau_o(\lambda)$ та інтегральний τ_o коефіцієнти пропускання.

Перепад освітленості від об'єкта і фону в площині МПВ описується формулою (2.43).

Для ідеального об'єктива розміри елементу розділення на поверхні Землі визначаються геометричними розмірами пікселя δV , δW .

Якщо ОЕСС характеризується одномірною МПФ $M_s(v_x)$, то просторове розділення системи можна визначити двома методами:

1. Заданим зменшенням контрасту у зображення $C_0 = M_s(v_{x0})$. При цьому елемент розділення на поверхні Землі визначається за формулою

$$\delta V = \frac{H}{2v_{x0}}, \quad (4.2)$$

де H - відстань від ОС до об'єкта; v_{x0} - кутова просторова частота, яка відповідає контрасту C_0 , рад⁻¹.

2. Більш універсальним критерієм розділення є геометрична шумова смуга пропускання GB

$$GB = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} M_o^2(v_x, v_y) dv_x dv_y.$$

Згідно цього критерію, просторове розділення ОЕСС визначається як

$$\delta V = \sqrt{\frac{GB}{\pi}}.$$

Остаточно маємо для одномірного випадку

$$\delta V = \frac{h_f}{\int_{-\infty}^{\infty} |M_s(v_x)|^2 dv_x}. \quad (4.3)$$

МПФ системи «об'єктив – МПВ» визначається добутком МПФ об'єктива $M_o(v_x)$ і МПФ МПВ $M_D(v_x)$. Для високоякісних об'єктивів МПФ апроксимуємо як

$$M_o(v'_x) = 1 - 1,22k_{eff}\lambda \frac{v'_x}{\eta_{di}}, \quad (4.4)$$

де $\eta_{di} = \frac{v'_{xr}}{v'_{xd}}$ – параметр апроксимації, який визначає відмінність МПФ реального об'єктива від дифракційно-обмеженого за певного контрасту. При наявності незначних аберацій: $\eta_{di} < 1$.

Узгодження роздільної здатності об'єктива і ПВ можна здійснювати за двома критеріями [103]:

1. На основі рівності МПФ об'єктива і ПВ на певній просторовій частоті v_{x1} . Частіше всього $M_{O1} = M_{D1} = 0,5$ (рис. 4.1). Тоді із формул (2.51) та (2.52) маємо

$$M_{O1}(v_{x1}) = 1 - 1,22k_{eff}\lambda \frac{v_{x1}}{\eta_{di}} = \frac{1}{2}; \quad M_D(v_x) = \frac{\sin(\pi V_D v_{x1})}{\pi V_D v_{x1}} = \frac{1}{2}. \quad (4.5)$$

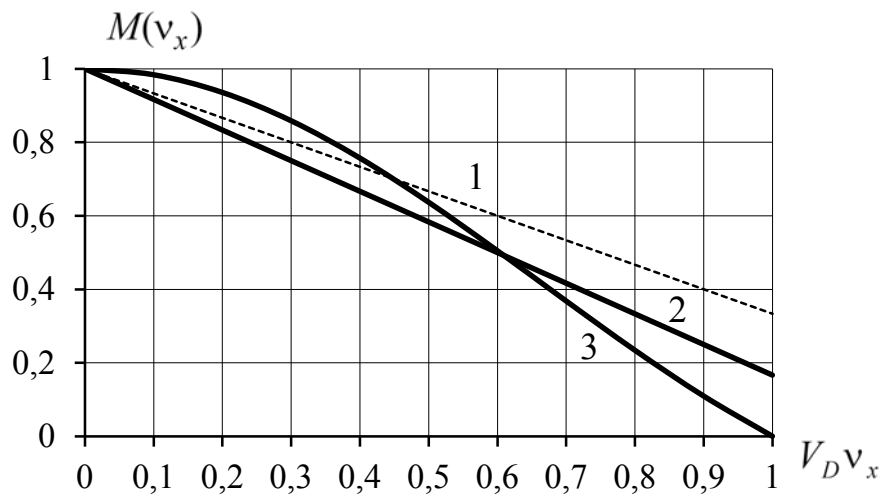


Рис. 4.1. Узгодження параметрів ОС та МПВ за роздільною здатністю:

1 – МПФ дифракційно обмеженого об'єктива; 2 – МПФ об'єктива за $\eta_{di} = 0,8$, що узгоджена з ПВ; 3 – МПФ ПВ з пікселем розміром V_D

Із останньої системи рівнянь маємо

$$v_{x1} = \frac{\eta_{di}}{2,44k_{eff}\lambda}; \quad v_{x1} = \frac{0,6}{V_D}. \quad (4.6)$$

Із порівняння двох останніх виразів знаходимо формулу для узгодження параметрів об'єктива і ПВ

$$k_{eff} = \frac{f_o'}{D_p} = 0,68 \frac{\eta_{di} V_D}{\lambda}. \quad (4.7)$$

Апроксимуємо елемент розділення системи «об'єктив – ПВ» у площині ПВ прямокутником розміром $V_s \times W_s$, одновимірний МПФ якої має згідно (2.51) вигляд

$$M_s^a(v_x) = \frac{\sin(\pi V_s v_x)}{\pi V_s v_x}. \quad (4.8)$$

Із умови перетину функцій (2.52) і (4.8) на рівні 0,5 отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} M_s(v_x) = 0,5 \\ M_s^a(v_x) = 0,5 \end{cases}. \quad (4.9)$$

Із другого рівняння (4.9) аналогічно з (4.6) маємо

$$v_{x2} = \frac{0,6}{V_s}. \quad (4.10)$$

Тоді перше рівняння (4.9) з урахуванням (4.7) запишемо у вигляді

$$\left(1 - \frac{V_D}{2V_s}\right) \frac{\sin\left(\pi V_D \frac{0,6}{V_s}\right)}{\pi V_D \frac{0,6}{V_s}} = \frac{1}{2}.$$

Розв'язком цього трансцендентного рівняння є

$$V_s = 1,49V_D. \quad (4.11)$$

2. За другим критерієм має бути забезпечена рівність МПФ об'єктива і МПВ на просторовій частоті Найквіста $v_N = 1/2V_D$, тобто $M_{ON}(v_N) = M_{DN}(v_N)$. Використовуючи (2.49) і (2.51) маємо

$$1 - 0,61 \frac{k_{eff} \lambda}{V_D \eta_{di}} = \frac{\sin(\pi/2)}{\pi/2} = \frac{2}{\pi}. \quad (4.12)$$

Звідки знаходимо вимоги до об'єктива за цим критерієм

$$\frac{D_p}{f_o'} \eta_{di} = 1,68 \frac{\lambda}{V_D}. \quad (4.13)$$

Аналіз формул (4.11) і (4.13) для узгодження роздільної здатності об'єктива і МПВ за двома розглянутими критеріями показує, що:

1. Просторова роздільна здатність ОЕСС за першим критерієм становить $v_{res1} = \frac{0,6}{V_D}$, а за другим критерієм – $v_{res2} = \frac{0,5}{V_D}$;
2. Контраст зображення за першим критерієм дорівнює 0,25, а за другим – 0,41;
3. Для обох критеріїв параметр об'єктива $\frac{D_p}{f'_o} \eta_{di}$ залежить від оберненої величини нормованого розміру пікселя ПВ $\frac{V_D}{\lambda}$.

Узгодження за енергетичними параметрами полягає в забезпеченні заданих значень відносного отвору D_p / f'_o або ефективного діафрагмового числа $k_{eff} = f'_o / D_p$ об'єктива і пороговою освітленістю МПВ, які визначають енергетичну роздільну здатність спектрального каналу ОЕСС [190]. Вихідними для розрахунку величини D_p є пороговий контраст коефіцієнта відбиття та порогова освітленість МПВ E_n , що описується формулою (2.78). Якщо пороговий контраст коефіцієнта відбиття дорівнює $\Delta\rho_n = \rho_t - \rho_b$, то відповідно до (2.77) порогова освітленість з врахуванням контрасту дорівнює

$$\Delta E' = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f'_o} \right)^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_A(\lambda) \tau_o(\lambda) E_{0\lambda}(\lambda) [\rho_t(\lambda) - \rho_b(\lambda)] d\lambda. \quad (4.14)$$

Для інтегральних параметрів останнє співвідношення спрощується до вигляду (п. 2.1.4)

$$E_n = \frac{1}{4} \left(\frac{D_p}{f'_o} \right)^2 \tau_A \tau_o E_0 \Delta\rho_n. \quad (4.15)$$

Звідки отримуємо співвідношення між діаметром вхідної зіниці, фокусною відстанню об'єктива та пороговою освітленістю МПВ

$$D_p = 2f'_o \sqrt{\frac{E_n}{\tau_A \tau_o E_0 \Delta\rho_n}}. \quad (4.16)$$

4.1.2 Узгодження параметрів об'єктивів двоканальної ОЕСС

Схемотехнічне рішення ОЕСС на базі дзеркально-лінзових об'єктивів, побудованих за коаксіальною схемою, можна віднести до найефективніших. В цьому випадку відсутній паралакс, характерний для схеми з повністю автономними спектральними каналами, та відсутня втрата просторового розділення в короткохвильовому діапазоні, характерна для багатодіапазонного МПВ.

Зазвичай вибір дзеркального та лінзового об'єктивів для коаксіальної схеми здійснюється виходячи з технологічних міркувань. Збільшення площі вхідної зіниці призводить до покращення енергетичних характеристик ОЕСС, але погіршує просторове розділення внаслідок зростання аберацій; дифракційне розділення при цьому збільшується [31].

В об'єктиві, що побудований за коаксіальною схемою, зміна одного з двох діаметрів вхідної зіниці викликає зміну іншого діаметру. Варіація діаметрів вхідних зіниць єдиного коаксіального об'єктива двоканальної ОЕСС призводить до зміщення системи з обмеженням шумами до обмежень просторовим розділенням і навпаки. Була виконано оцінку меж таких зміщень і розроблено методику узгодження діаметрів вхідних зіниць [191].

Кожен із каналів досліджуваної двоканальної ОЕСС має об'єктив та МПВ, які розташовані на спільній оптичній осі. Об'єктив першого каналу (ТПВ) при цьому має центральне екранування (рис. 4.2). Для досягнення необхідних вихідних характеристик, в першу чергу – просторового розділення, ТПВ каналу діаметр кожного із компонентів другого ТВ каналу не повинен перевищувати діаметр зони екранування першого [31].

Для оцінки ефективності ТВ і ТПВ каналів при зміні діаметрів вхідних зіниць має використовуватись показник, який включає в себе не тільки основні формуючі чинники кінцевого зображення, але й дозволяє оцінити якість комплексованого зображення. Одним з найточніших на сьогодні таких показників, як відмічено в розділі 3, є показник успішності виконання завдання *ТТР*. Він обраховується за формулами (3.101) - (3.105) а ФПК ОЕСС – за формулою (3.107).

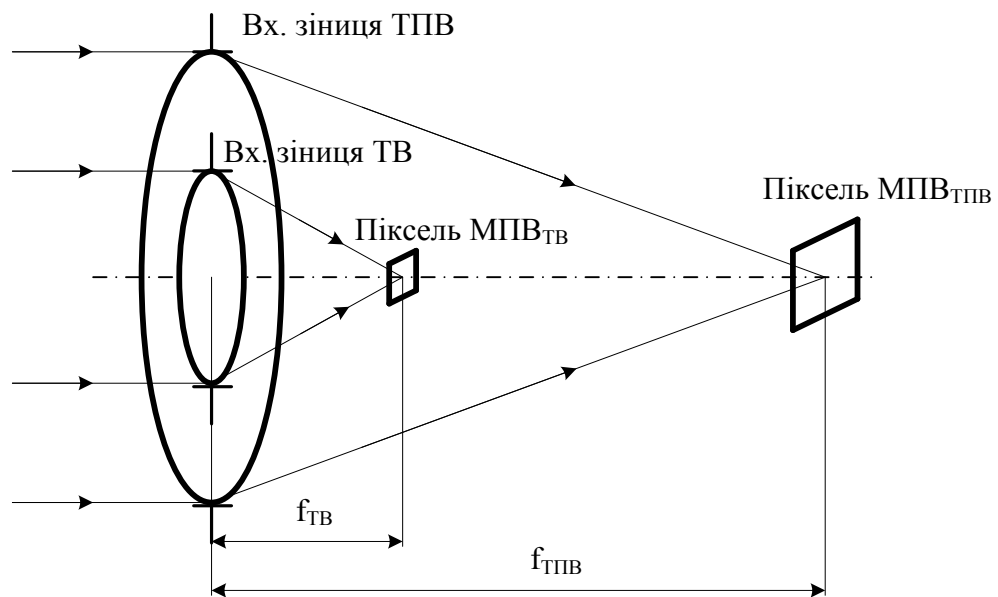
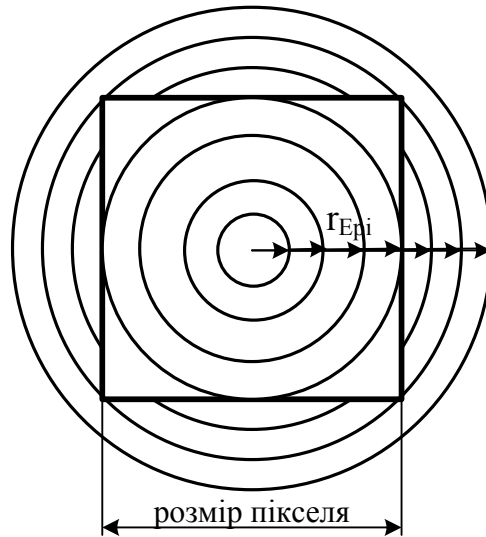


Рис. 4.2. Схематичне представлення ОС двоканальної ОЕСС, побудованої по коаксіальній схемі

Узгодження діаметрів вхідних зіниць виконується шляхом максимізації показника TTP змінюючи радіус кружка E_i відносно розміру пікселя МПВ, зображеного на рис. 4.2 (рис. 4.3).

Запропонований метод дозволяє оцінювати будь-які ТВ та ТПВ канали. Для прикладу виберемо стандартні на даний час параметри каналів.

Вхідними даними для розрахунків є кут поля зору (однаковий для ТВ та ТПВ каналу) – 6° ; МПВ ТВ каналу – ПЗЗ матриця, розмір чутливого елементу $5,5 \times 5,5$ мкм², формат 1920×9216 ; МПВ ТПВ каналу – мікроболометрична матриця, розмір чутливого елементу 35×35 мкм², формат 384×288 ; збільшення системи – 8; ТПВ канал працює в діапазоні спектру (8 - 12) мкм; діаметр вхідної зіниці ТПВ каналу не повинен перевищувати 100 мм (для бронетанкової техніки). Змінними величинами є діаметри вхідних зіниць ТВ та ТПВ каналів, причому вхідна зіниця ТВ каналу дорівнює діаметру зони екранування ТПВ каналу. Знаючи кут поля зору та розміри МПВ, знаходимо фокусну відстань кожного каналу: для ТПВ – 128,34 мм, для ТВ – 91,67 мм. Задаємо радіус кружка E_i для ТПВ каналу (17,5 мкм). Знаходимо відносний отвір ТПВ каналу (0,74) [31].

Рис. 4.3. Радіус кружка E_{pi}

Враховуючи той факт, що ОС ТПВ каналу має центральне екранування, знаходимо ефективний діаметр ОС ТПВ каналу (95,59 мм). Знаючи ефективний діаметр та діаметр (змінний) входної зіниці ТВ каналу при різних значеннях кружка E_{pi} (для ТВ каналу) знаходимо діаметр входної зіниці ТПВ каналу (змінний діаметр) із формули:

$$D_{eff} = 2\sqrt{(D_{ТПВ}/2)^2 - (D_{ТВ}/2)^2},$$

де D_{eff} – ефективний діаметр входної зіниці ТПВ каналу, $D_{ТПВ}$, $D_{ТВ}$ – діаметр входної зіниці ТПВ і ТВ каналів відповідно.

МПФ ОС, вважаючи, що вона дифракційно обмежена, знаходимо за формулою, наведеною в [133], МПФ МПВ та дисплея – [133], МПФ ока – [192], ФПК ока – [187], ширину смуги шумів – [186], коефіцієнт пропорційності для ТПВ каналу $\alpha = 862, \sqrt{\text{Гц}}$ [183], а для ТВ $\alpha = 169,6, \sqrt{\text{Гц}}$ [183], $\sigma = 0,02$, с·мрад² [186], яскравість дисплея – 17 кд/м².

Показник TTP був розрахований при різних діаметрах входної зіниці та при різних коефіцієнтах екранування для ТПВ каналу і відповідно при різних діаметрах входної зіниці для ТВ каналу. ФПК ОЕСС зображено на рис. 4.4. Результати розрахунків наведено в табл. 4.1.

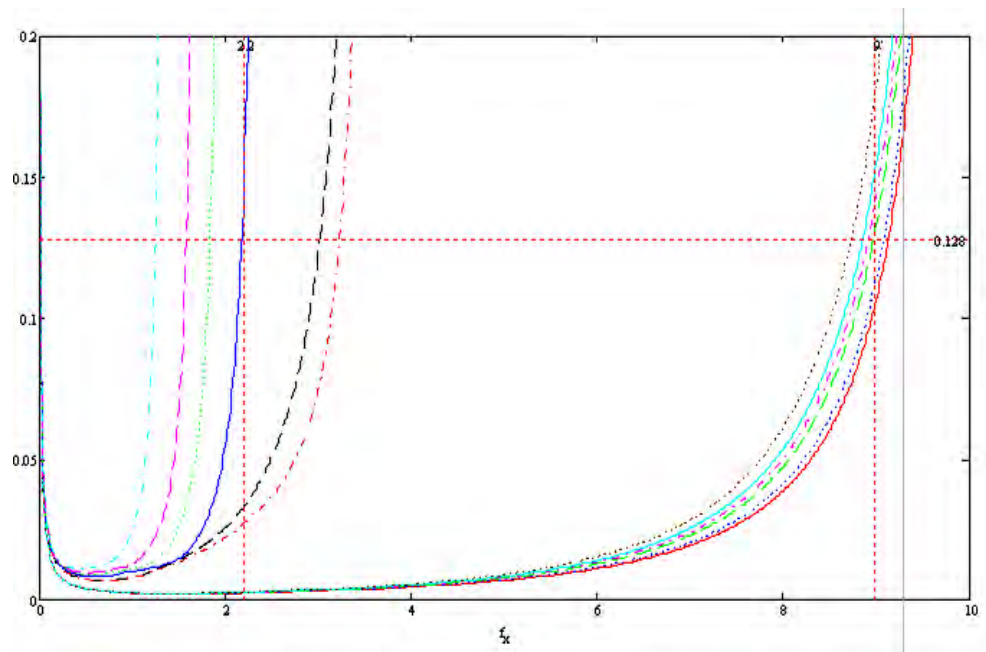


Рис. 4.4. ФПК для ТВ та ТПВ каналів

Таблиця 4.1

Розрахований показник TTP

№	Радіус кружка Ері для ТПВ каналу	Радіус кружка Ері для ТВ каналу	Діаметр Вхідної зіниці ТВ каналу	Діаметр вхідної зіниці ТПВ каналу	Коефіцієнт екранування	Показник TTP для ТПВ каналу	Показник TTP для ТВ каналу
1	17,5	0,625	98,42	133	0,74	9,36	40,43
2	17,5	1,25	49,21	102	0,48	11,11	39,85
3	17,5	1,875	32,81	95,3	0,34	10,8	39,27
4	17,5	2,5	24,61	92,8	0,26	9,45	38,66
5	17,5	3,02	20,38	91,8	0,22	7,96	38,14
6	17,5	3,54	17,4	91,15	0,19	7,01	37,62

Як видно із табл. 4.1 показник успішності виконання завдання зменшується зі збільшенням радіуса кружка Ері і, відповідно, зменшенням діаметра вхідної зіниці; також має місце зниження показника при великих значеннях коефіцієнта екранування (для ТПВ каналу). Для ТПВ каналу показник має найбільші значення у варіантах 2 – 4, проте у варіанті 2 і 3 коефіцієнт екранування перевищує 30%, а діаметр вхідної зіниці перевищує 100 мм, що є неприйнятним. У варіанті 4 виконуються всі умови, але екстремум лежить в діапазоні між варіантами 3 і 4.

Детальне дослідження діапазону між варіантами 3 і 4 (табл. 4.2) показує, що показник успішності виконання завдання, при виконанні вимог щодо діаметра вхідної зіниці та коефіцієнта екранування, має максимальне значення у варіанті 3.

Таблиця 4.2

Конструктивні варіанти вхідної ОС

№	Радіус кружка Ері для ТВ каналу	Радіус кружка Ері для ТПВ каналу	Діаметр вхідної зіниці ТВ каналу	Діаметр вхідної зіниці ТПВ каналу	Коефіцієнт екранування	Показник для ТПВ каналу	Показник для ТВ каналу
1	1,9	16,5	32,38	100,27	0,32	10,9	39,24
2	2	16,5	30,76	99,76	0,31	10,68	39,14
3	2,1	16,5	29,29	99,31	0,29	10,46	39,05
4	2,2	16,5	27,96	98,93	0,28	10,23	38,95
5	2,3	16,5	26,74	98,59	0,27	9,96	38,85
6	2,4	16,5	25,63	98,3	0,26	9,71	38,75
7	2,5	16,5	24,61	98,03	0,25	9,43	38,66

Змінюючи радіус кружка Ері для ТПВ каналу досліджуємо варіант 3 (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Розрахунок показника TTP для 3-го варіанту

№	Радіус кружка Ері для ТПВ каналу	Радіус кружка Ері для ТВ каналу	Діаметр вхідної зіниці ТВ каналу	Діаметр вхідної зіниці ТПВ каналу	Коефіцієнт екранування	Показник для ТПВ каналу	Показник для ТВ каналу
1	16,3	2,1	29,29	100,43	0,29	10,49	39,05
2	16,4	2,1	29,29	99,87	0,29	10,47	39,05
3	16,5	2,1	29,29	99,31	0,29	10,46	39,05
4	16,6	2,1	29,29	98,77	0,3	10,44	39,05

Результати показують, що показник успішності виконання завдання (за умови виконання вимог щодо діаметра вхідної зіниці та коефіцієнта екранування) має найбільші значення (ТПВ канал – 10,47, ТВ канал – 39,05) при наступному співвідношенні діаметрів вхідних зіниць: ТПВ канал – 100 мм, ТВ канал – 29,3 мм.

В даному випадку діаметр кружка E_r є меншим за розміри пікселя для обох каналів.

Отже показник успішності виконання завдання TTP дозволяє узгодити діаметри вхідних зіниць дзеркально-лінзового об'єктиву двоканальної ОЕСС, побудованого по коаксіальній схемі, проте остаточні параметри об'єктиву слід обирати після узгодження отриманих даних з конструктивними та технологічними вимогами.

4.2 Узгодження геометричних параметрів малогабаритних прицільних ОЕСС

Головною споживчою характеристикою прицільних ОЕСС є точність наведення візирної осі на об'єкт спостереження. Точність оцінюється паралактичною похибкою. Розглянемо методи розрахунку і узгодження параметрів різних схемотехнічних рішень ОЕСС коліматорного та телескопічного типів.

4.2.1 Коліматорні ОЕСС

В першому розділі було обгрунтовано необхідність визначення умов мінімізації паралактичної похибки в лінзових моноблоках КП.

На рис. 4.5 зображено лінзовий моноблок, що складається з двох оптичних елементів з різного сорту скла [193]. Лінзу 1 товщиною d_1 виготовлено зі скла з показником заломлення n_2 , а пластинку 2 товщиною d_2 - зі скла з показником заломлення n_3 .

Параксіальний промінь в прямому ході, що йде паралельно до оптичної осі, фокусується сферичною поверхнею з радіусом кривизни $r_1 = |OA|$ в точці F_1 , віддаленої від заломлюючої поверхні на відстань

$$s' = \frac{n_2 r_1}{n_2 - 1}. \quad (4.17)$$

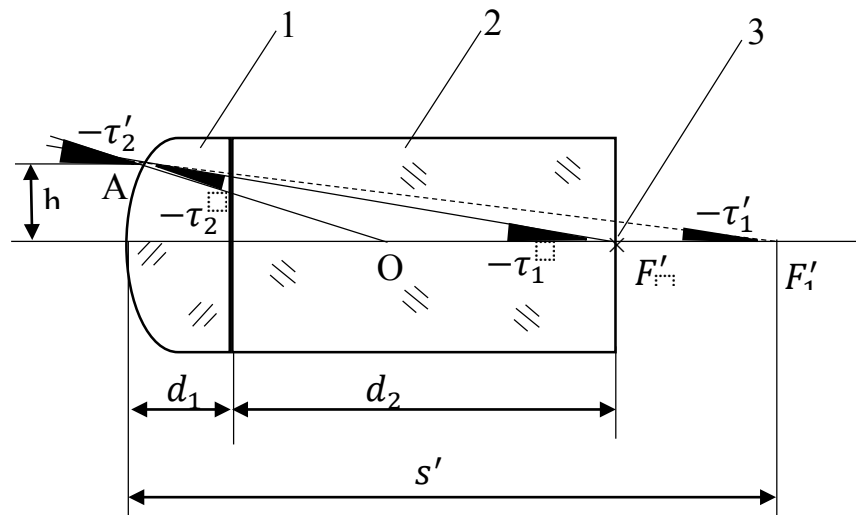


Рис. 4.5. Лінзовий моноблок: 1 - лінза, 2 - плоско-паралельна пластина, 3 - прицільна сітка

Відстань s' і товщини d_1, d_2 пов'язані співвідношенням

$$s' = d_1 + \frac{n_2 d_2}{n_3}. \quad (4.18)$$

За умови нормування $(d_1 + d_2) = 1$, із формул (4.17) й (4.18)

$$r_1 = (n_2 - 1) \left[d_1 \left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_3} \right) + \frac{1}{n_3} \right]. \quad (4.19)$$

У першому окремому випадку, коли $d_1 = 0$, моноблок є одною товстою лінзою зі скла з показником заломлення n_3 і

$$r_1 = \frac{(n_3 - 1)}{n_3}. \quad (4.20)$$

У другому окремому випадку, коли $d_1 = 1$, моноблок є однією товстою лінзою зі скла з показником заломлення n_2 і

$$r_1 = \frac{(n_2 - 1)}{n_2}. \quad (4.21)$$

При відомих параметрах моноблока r_1 , d_i та n_i і заданому значенні апертурного кута τ_1 довільного променя з точки F' в зворотному ході - кут τ_1' його нахилу після заломлення на площині знаходимо за формулою Снеліуса

$$\sin \tau_1' = (n_3 / n_2) \sin \tau_1. \quad (4.22)$$

З трикутника AOF'₁ знаходимо кут τ_2 нахилу променя

$$\sin \tau_2 = [(d_2 \operatorname{tg} \tau_1 / r_1 \operatorname{tg} \tau'_1) - 1 + d_1 / r_1] \cdot \sin \tau'_1. \quad (4.23)$$

Кут τ'_2 нахилу променя на виході моноблока визначаємо за формулою

$$\sin \tau'_2 = n_2 \sin \tau_2. \quad (4.24)$$

Вираз для паралактичної похибки δ даного променя має вигляд

$$\delta = \tau'_2 - \tau_2 - \tau'_1.$$

При цьому координата h променя на вихідній зіниці обчислюється за формулою $h = r_1 \sin(\tau_2 + \tau'_1)$, а маса моноблока M - за наближеною формулою

$$M \approx \pi h^2 [d_1(\phi_1 - \phi_2) + \phi_2], \quad (4.25)$$

де ϕ_i - питома вага скла.

Наприклад, при $n_1 = 1,8138$ (скло ТФ10, у якого $\phi_1 = 5,19$ г/см³) і $n_2 = 1,4721$ (скло ЛК7, у якого $\phi_2 = 2,3$ г/см³), що відповідає максимальному і мінімальному значенню показника заломлення скла, яке випускається вітчизняною промисловістю, отримуємо

$$r_1 = 0,5528 - 0,1041d_1; \quad M \approx (9,07d_1 + 7,23)h^2;$$

$$r_{1\max} = 0,4478; \quad M_{\max} \approx 16,3 h^2;$$

$$r_{1\min} = 0,3207; \quad M_{\min} \approx 7,23 h^2.$$

У випадку, коли $d_1 = 0$ або $d_1 = 1$, формули (4.22), (4.23) й (4.24) набувають вигляду

$$\tau'_1 = \tau_1;$$

$$\sin \tau_2 = \sin \tau_1 / (n_{2(3)} - 1); \quad (4.26)$$

$$\sin \tau'_2 = n_{2(3)} \cdot \sin \tau_1 / (n_{2(3)} - 1),$$

а вираз для паралактичної похибки

$$\delta = \tau'_2 - \tau_2 - \tau_1. \quad (4.27)$$

Підставляючи в вирази (4.26) і (4.27) знайдені екстремальні значення r_1 ,

одержуємо остаточні вирази для кутів τ_2 і τ_2' . Для $r_{1\max}$ маємо

$$\sin \tau_2 = 1,2288 \sin \tau_1; \quad \sin \tau_2' = 2,2288 \sin \tau_1.$$

Для $r_{1\min}$ маємо

$$\sin \tau_2 = 2,1182 \sin \tau_1; \quad \sin \tau_2' = 3,1182 \sin \tau_1.$$

Зауважимо, що відношення $\operatorname{tg} \tau_1 / \operatorname{tg} \tau_1'$ у формулі (4.23) можна апроксимувати виразом $\sin \tau_1 / \sin \tau_1'$, при цьому похибка апроксимації не перевищить 0,5% для кута τ_1 до 90° . Підставляючи в (4.22) - (4.24) значення n_i , (4.26) і апроксимацію, отримуємо остаточні вирази для загального випадку кутів τ_1' , τ_2 й τ_2'

$$\sin \tau_1' = 0,8116 \sin \tau_1,$$

$$\sin \tau_2 = (0,5513 - 0,1039 \cdot d_1) \sin \tau_1 / (0,5528 - 0,1041 \cdot d_1),$$

$$\sin \tau_2' = (1 - 0,1885 \cdot d_1) \cdot \sin \tau_1 / (0,5528 - 0,1041 \cdot d_1).$$

На рис. 4.6 приведені графіки залежності $\delta = F(h)$ для екстремальних і трьох проміжних значень d_1 : 0,25; 0,5 і 0,75. Обмежуючи граничну паралактичну похибку значенням 3 мрад (відповідає промаху 0,3 м на дальності 100 м), визначимо за графіками лінійну апертуру D прицілу і обчислимо його масу при конструктивному різному виконанні моноблока (табл. 4.4)

Таблиця 4.4

Масогабаритні параметри варіантів моноблока

Товщина	Тип скла	Діаметр	Маса
$d_1 = 0$ (крива 1)	Скло ЛК7	$D = 0,174$	$M = 0,0547$
$d_1 = 1$ (крива 2)	Скло ТФ10	$D = 0,25$	$M = 0,2547^*$
$d_1 = 0,25$ (крива 3)	Скло ТФ10/ЛК7	$D = 0,276$	$M = 0,1809$
$d_1 = 0,5$ (крива 4)	Скло ТФ10/ЛК7	$D = 0,27$	$M = 0,2144$
$d_1 = 0,75$ (крива 5)	Скло ТФ10/ЛК7	$D = 0,26$	$M = 0,2371$

* маса моноблока може бути знижена до 0,1809 при виконанні поверхні склеювання по радіусу, рівному d_2

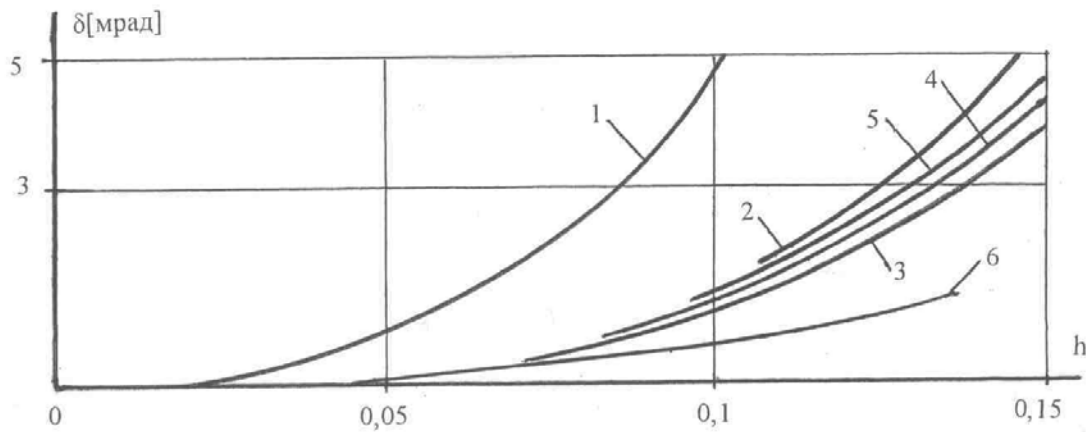


Рис. 4.6. Графіки залежності $\delta = F(h)$

Зіставлення цих конструктивних виконань КП по методиці, викладеній в [30], показує, що по узагальненого показника якості перевагу має склеєний моноблок з товщиною лінзи $d_1 = 0,25$.

Одним з можливих шляхів підвищення точності в лінзових моноблочних КП є застосування сферичної поверхні склеювання деталей 1 і 2 (рис. 4.7).

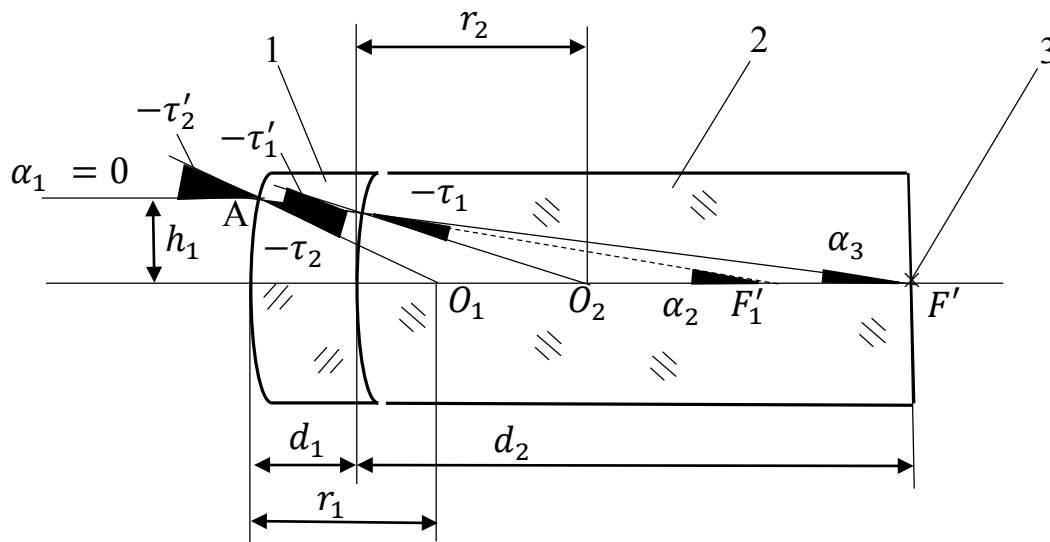


Рис. 4.7. Лінзовий моноблок: 1 – лінза, 2 – лінзовий елемент, 3 – прицільна сітка, τ_i і τ'_i – кути заломлення променя, α_i – кути нахилу першого допоміжного променя

Відповідно до теорії аберацій третього порядку паралактична похибка, яка обумовлена сферичною аберацією, буде виключена за умови

$$\sum h_k P_k = 0,$$

де h_k - висота першого допоміжного променя на заломлюючій поверхні з номером k ($k = 1, 2$); P_k - основний параметр цієї поверхні, який визначається залежністю $P_k = (\alpha_{k+1}\mu_{k+1} - \alpha_k\mu_k)(\alpha_{k+1} - \alpha_k)^2 / (\mu_{k+1} - \mu_k)^2$, де α_k - кут нахилу допоміжного променя на поверхні з номером k ($k=1,2,3$), а $\mu_k = n_{k-1}$.

Проводячи розрахунок в прямому ході променів, прийнемо умови нормування: $\alpha_1=0$; $h_1=0,138$ (відповідає максимальному знайденому значенню $D/2$); $d_1=0,25$; $d_2=0,75$; $\mu_1=1$; $\mu_2=1/0,8138=0,5513$ й $\mu_3=1/1,4721=0,6793$.

У параксіальній області

$$h_2 = h_1 - d_1\alpha_2 = 0,138 - 0,25\alpha_2, \quad (4.28)$$

$$\alpha_3 = h_2 / d_2 = 0,184 - 0,3333\alpha_2. \quad (4.29)$$

З урахуванням цього виразу співвідношення для основних параметрів заломлюючих поверхонь набувають вигляду

$$P_1 = \alpha_2^3 \mu_2 / (\mu_2 - 1)^2 = 2,7383 \cdot \alpha_2^3; \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} P_2 &= (\alpha_3\mu_3 - \alpha_2\mu_2)(\alpha_3 - \alpha_2)^2 / (\mu_3 - \mu_2)^2 = \\ &= 60,9757 \left(-1,3826 \alpha_2^3 + 0,6038\alpha_2^2 - 0,0877\alpha_2 + 0,0042 \right). \end{aligned} \quad (4.31)$$

Після підстановки (4.28), (4.30) і (4.31) в (4.27) і перетворень отримуємо рівняння $21,0793 \cdot (\alpha_2^4 - 0,9708 \cdot \alpha_2^3 + 0,3043 \cdot \alpha_2^2 - 0,0382 \cdot \alpha_2 + 0,0017) = 0$.

Це рівняння має два уявних і два дійсних кореня: $\alpha_2^{(1)}=0,5044$ і $\alpha_2^{(2)}=0,2295$. Підставляючи знайдені дійсні значення $\alpha_2^{(i)}$ в (4.30) і (4.31), знаходимо дві пари значень $h_2^{(i)}$ і $\alpha_3^{(i)}$

$$\begin{aligned} h_2^{(1)} &= 0,0119; & \alpha_3^{(1)} &= 0,0159; \\ h_2^{(2)} &= 0,0806; & \alpha_3^{(2)} &= 0,01075. \end{aligned}$$

Радіуси кривизни заломлюючих поверхонь r_k визначимо за формулою [195]

$$r_k = h_k(n_{k+1} - n_k) / (\alpha_{k+1}n_{k+1} - \alpha_k n_k).$$

Перше значення кута $\alpha_2^{(1)}$ дає радіуси, які є технологічно нездійсненними. Для другого значення $\alpha_2^{(2)}$ знаходимо

$$r_1 = h_1(n_2 - 1) / \alpha_2 n_2 = 0,2698;$$

$$r_2 = h_2(n_3 - n_2) / (\alpha_3 n_3 - \alpha_2 n_2) = 0,1067.$$

З рис. 4.7 знаходимо габаритні співвідношення між лінійними і кутовими величинами:

$$O_1F'_1 = O_2F'_1 + r_2 + d_1 - r_1 = O_2F'_1 + 0,0869; \quad O_2F' = d_1 - r_2 = 0,6433;$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 + \tau'_1 - \tau_1.$$

При відомих параметрах моноблока - r_i , d_i та n_i і заданому значенні апертурного кута τ_3 довільного променя з точки F' в зворотному ході - кут τ_1 його нахилу після заломлення знаходимо з трикутника O_2BF' в зворотному ході променів

$$\sin \tau_1 = O_2F' \cdot \sin \tau_3 / r_2 = 6,0291 \cdot \sin \tau_3.$$

З трикутника $O_2BF'_1$ знаходимо відрізок $O_2F'_1$

$$O_2F'_1 = r_2 \sin \tau'_1 / \sin \alpha_2.$$

З трикутника $O_1AF'_1$ знаходимо кут τ_2

$$\sin \tau_2 = O_1F'_1 \sin \alpha_2 / r_1 = (3,7064 O_2F'_1 + 0,3221) \sin \alpha_2.$$

Згідно з рис. 4.7 паралактична похибка δ в цьому випадку визначається формулою

$$\delta = \tau'_2 - \tau_2 - \alpha_2,$$

а координата h_1 променя на вихідному зіниці обчислюється за формулою

$$h_1 = r_1 \sin(\tau_2 + \alpha_2) = 0,2698 \cdot \sin(\tau_2 + \alpha_2).$$

Графік залежності $\delta = f(h_1)$ представлений на рис. 4.6 кривою 6. Як впливає із зіставлення кривих 3 і 6, введення сферичної поверхні склеювання в 2,5 рази

підвищує точність лінії прицілювання при рівних масогабаритних характеристиках КП.

За умови різких змін температури надійність КП значно підвищилася б в разі виконання його з однорідного матеріалу. Це можливо у варіантах оптичних схем з використанням голографічних оптичних елементів (ГОЕ) [196].

На рис. 4.8 зображено принципову оптичну схему малогабаритного дзеркального моноблочного КП, яка реалізує властивість кутової селективності ГОЕ. Моноблок є паралелепіпедом, утвореним при склеюванні чотирьох оптичних деталей, виготовлених з однакового оптичного матеріалу.

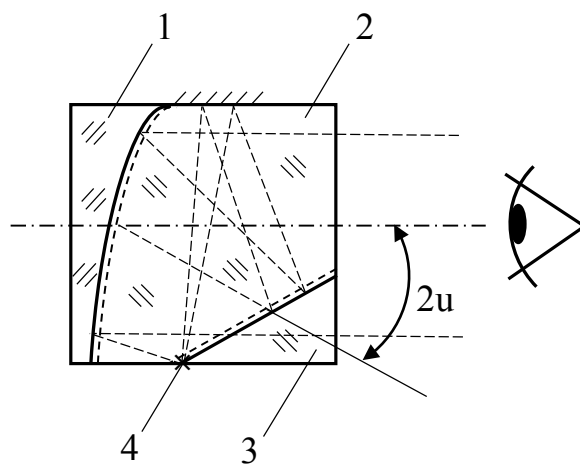


Рис. 4.8. Перший варіант принципової оптичної схеми КП:

1 - лінзовий елемент з інтерференційним відбиваючим покриттям на увігнутій сферичній поверхні, що виконує функцію дзеркального колімуючого об'єктива; 2 - лінзовий елемент з дзеркальним покриттям на плоскій бічній грані; 3 - призма з ГОЕ на гіпотенузній грані; 4 - сітка, що освітлюється світлодіодом (на схемі не показаний)

Моноблочність конструкції забезпечується за рахунок поєднання дзеркального покриття і сітки 4 з протилежними бічними гранями лінзового елемента 2. Пучки променів від сітки 4 (на рис. 4.8 пунктиром показаний пучок променів від центральної точки), спочатку відбиваються дзеркалом на плоскій бічній грані лінзового елемента 2 в напрямку ГОЕ на призмі 3. Після дифракції на

ГОЕ, пучок заповнює апертуру дзеркального об'єктива. Відбиваючись об'єктивом, пучок колімується і проходить ГОЕ під постійним кутом, який перевищує кут падіння пучка після першого відбиття. У підсумку, оператор візує колімоване зображення прицільної сітки на тлі навколишнього простору, що спостерігається через ГОЕ і інтерференційне дзеркало.

Для того, щоб створити умови для реалізації властивості кутової селективності ГОЕ, необхідно децентрувати дзеркальний об'єктив на кут $2u$. Встановимо залежність різниці δ кутів падіння на ГОЕ крайнього променя, відбитого дзеркалом на бічній грані, і колімованого променя, сформованого дзеркальним об'єктивом.

Розглянемо в параксіальній області променів моноблок з лінійною апертурою вихідної зіниці h_1 (висота) $\times h_2$ (ширина) з урахуванням децентрування $2u$. На рис. 4.9 центр зіниці позначено буквою A , кутові точки зіниці - C_i , а центральна точка прицільної сітки - буквою O .

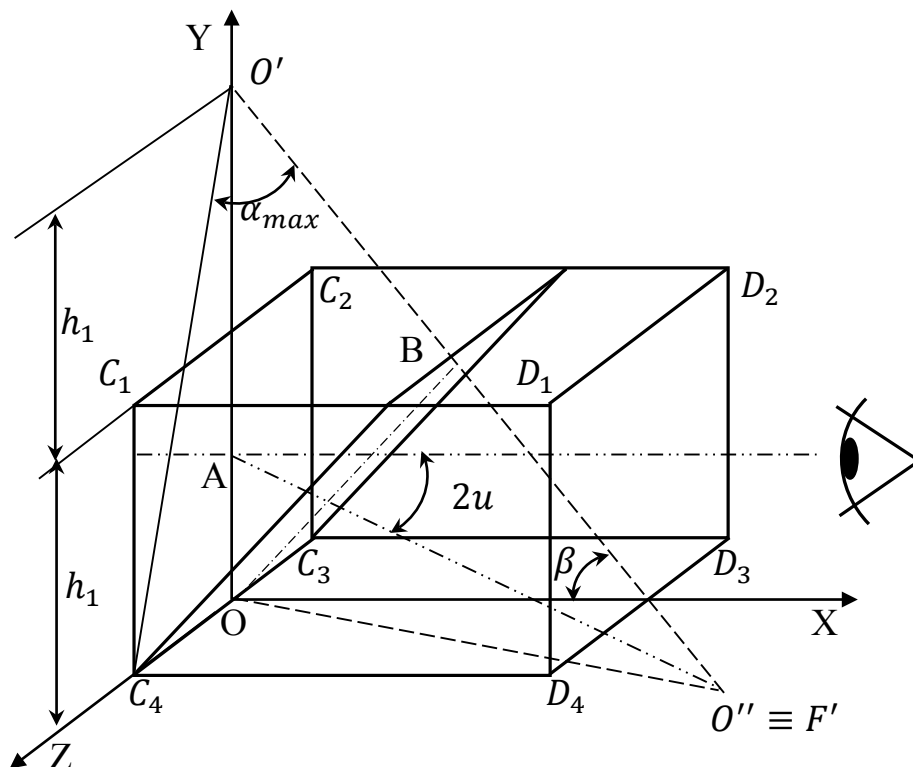


Рис. 4.9. Розрахункова схема моноблока по першому варіанту

Для мінімізації довжини моноблока сітка повинна розташовуватись поблизу його ребра C_3C_4 . Якщо дзеркальна площина сполучена з гранню $C_1C_2D_2D_1$, то зображення точки O займає положення O' , віддалене від дзеркальної площини на відстань h_1 . Сумістимо нижнє ребро гіпотенузної грані призми з ребром C_3C_4 . При цьому нахил гіпотенузної грані призми з ГОЕ повинен вибиратися з умови суміщення зображення O'' точки O' з фокальною поверхнею F' дзеркального об'єктива. Тобто відрізок $O'F'$ є нормаллю до гіпотенузної грані, точка B лежить на середині нормалі, а $OO' = OF'$.

Виберемо систему координат $OXYZ$, початок якої лежить в центральній точці сітки, вісь X збігається з нульовою лінією прицілювання, вісь Y збігається з відрізком OO' , а вісь Z збігається з відрізком OC_4 . Прийнемо умову нормування $h_1=1$ і введемо взаємозв'язок між параметрами h_1 і h_2 виду: $h_2 = kh_1$, де $k = 3/4$ або $k=4/3$ в залежності від того, з якими протилежними бічними гранями суміщені дзеркальне покриття і сітка. Якщо вони поєднані з більш віддаленими гранями, то $k = 3/4$; якщо ж вони поєднані з менш віддаленими гранями, то $k = 4/3$.

У прийнятій системі координат відрізок AF' оптичної осі описується рівнянням

$$y = 0,5 - x \cdot \operatorname{tg} 2u, \quad (4.32)$$

а коло, на якому лежать точки O' і F' , - рівнянням

$$y^2 + x^2 = 4. \quad (4.33)$$

Спільне рішення рівнянь (4.32) і (4.33) дає координату $x_{F'}$ фокусу F' об'єктива як функцію кута $2u$

$$x_{F'} = [\operatorname{tg} 2u + (15 + 16 \operatorname{tg}^2 2u)^{1/2}] / 2(1 + \operatorname{tg}^2 2u). \quad (4.34)$$

Знаючи координати точки $O'(0,2)$ і $x_{F'}$, визначимо віддалення точки O' від площини ГОЕ

$$O'B = [x_{F'}^2 + (1,5x_{F'} \cdot \operatorname{tg} 2u)^2]^{1/2} / 2. \quad (4.35)$$

Далі, з трикутника $OO'B$ визначимо довжину відрізка BO

$$BO = [(OO')^2 - (O'B)^2]^{1/2} = [16 - x_{F'}^2 - (1,5 + x_{F'} \operatorname{tg} 2u)^2]^{1/2} / 2. \quad (4.36)$$

З рис. 4.9 видно, що кут β , під яким промені від центральної точки прицільної сітки проходять через ГОЕ, визначається з трикутником $OO'B$

$$\operatorname{tg} \beta = O'B / BO. \quad (4.37)$$

Після підстановки формул (4.35) і (4.36) в (4.37) отримуємо остаточний вираз для обчислення кута β

$$\operatorname{tg} \beta = \{[x_{F'}^2 + (1,5x_{F'} \operatorname{tg} 2u)^2] / [16 - x_{F'}^2 - (1,5 + x_{F'} \operatorname{tg} 2u)^2]\}^{1/2}. \quad (4.38)$$

З трикутника BOC_4 знаходимо віддалення точки C_4 (крайньої точки в площині ГОЕ), в яку приходить під максимальним кутом падіння α_{\max} промінь, відбитий дзеркалом на бічній грані лінзового елемента 2

$$BC_4 = [(BO)^2 + (h_2 / 2)^2]^{1/2} = [16 - x_{F'}^2 - (1,5 + x_{F'} \operatorname{tg} 2u)^2 + k^2]^{1/2} / 2. \quad (4.39)$$

Кут α_{\max} визначається з трикутника C_4BO'

$$\operatorname{tg} \alpha_{\max} = BC_4 / OB' = \{[16 - x_{F'}^2 - (1,5 + x_{F'} \operatorname{tg} 2u)^2 + k^2] / [x_{F'}^2 + (1,5x_{F'} \operatorname{tg} 2u)^2]\}^{1/2}. \quad (4.40)$$

Таким чином, різницевий кут $\delta = f(2u, k)$ визначається формулою

$$\delta = \beta - \alpha_{\max}, \quad (4.41)$$

де кути β і α_{\max} визначаються з (4.38) та (4.40), а координата $x_{F'}$ – формулою (4.34).

Для забезпечення високих світлотехнічних показників (дифракційна ефективність $\rho_\lambda \geq 0,7$, а спектральний коефіцієнт пропускання $\tau_\lambda \geq 0,7$) мінімальний кут δ повинен лежати в діапазоні $(15^\circ \pm 3^\circ)$. Із (4.41) маємо, що для середнього значення $\delta=15^\circ$ необхідна кутова селективність досягається при куті $2u=28,9^\circ$, якщо $k=3/4$, і при куті $2u=31,3^\circ$, якщо $k=4/3$. Це означає, що найбільш сприятливі умови для точності мають місце при $k=3/4$, тобто коли дзеркальне покриття і сітка суміщені з більш віддаленими протилежними бічними гранями лінзового елемента 2. Це слід враховувати при компонованні прицілу на зброю. Якщо приціл розміщується збоку ($h_1=1$, $h_2=3/4$), то дзеркальне покриття повинне наноситися на верхню/нижню грань, а сітка повинна поєднуватися з нижньою/верхньою гранню лінзового елемента 2. Якщо ж приціл розміщується на місці прицільної планки ($h_1=1$, $h_2=4/3$), то дзеркальне покриття повинне наноситися

на ліву/праву бокову грань, а сітка повинна поєднуватися з правою/лівою бічною гранню лінзового елемента 2.

Рішення системи рівнянь (4.32) і (4.33) при $2u = 28,9^\circ$ дає: $x_{F'} = 1,92$; $y_{F'} = -0,56$. Фокусна відстань f' дзеркального об'єктива пов'язана з координатами точки F' залежністю $(x_{F'} + f')^2 + (0,5 - y_{F'})^2 = 4f'^2$, рішення якого дає значення $f' = 2,2$. Таким чином, дзеркальний об'єктив має відносний отвір 1:1,4 при куті децентрування $2u = 28,9^\circ$. Підстановка значення $2u = 28,9^\circ$ в (4.38) визначає кут $\beta = 53,1^\circ$, з яким пов'язана відносна довжина l моноблока:

$$l = \operatorname{tg} \beta + t^*,$$

де t^* - відносна товщина лінзового елемента 1.

Якщо прийняти $t^* \rightarrow 0$, то при $2u = 28,9^\circ$ отримуємо $l \approx 1,33$.

Розрахунок точності в обох варіантах компоновання прицілу показує, що при розміщенні моноблока збоку зброї гранична паралактична похибка лінії прицілювання, обумовлена сферичної формою відбиваючої поверхні дзеркального об'єктива і довільним положенням ока оператора в межах вихідної зіниці прицілу, становить $3\sigma = 21$ мрад по вертикалі і $3\sigma = 0,6$ мрад по горизонталі. При розміщенні моноблока на місці прицільної планки та ж гранична похибка становить 0,6 мрад по вертикалі і 21 мрад по горизонталі.

На рис. 4.10 зображено оптичну схему дзеркального моноблочного КП з ГОЕ. Моноблок є паралелепіпедом, утвореним при склеюванні трьох оптичних деталей, виготовлених з однакового оптичного матеріалу.

Пучки променів від сітки 2 (на рис. 4.10 пунктиром показано пучок променів від центральної точки), спочатку дифрагують на ГОЕ в напрямку нижньої полірованої грані моноблока. Зазнаючи повного внутрішнього відбиття, пучок заповнює апертуру дзеркального колімуючого об'єктива і проходить по нормалі до ГОЕ на пластині 4. В результаті, оператор візує колімоване зображення прицільної сітки на тлі навколишнього простору, що спостерігається через ГОЕ і інтерференційне дзеркало.

селективності ГОЕ в цій схемі, крайній промінь, що виходить з точки O під кутом δ до нульової лінії прицілювання, після всіх відбиттів повинен прийти в крайню точку C апертури об'єктива. При цьому віддалення l ГОЕ від точки A - центру об'єктива - знаходиться за формулою

$$l = h_1 / 2 \operatorname{tg} \delta.$$

При $\delta = 15^\circ$ і умові нормування $h_1 = 1$ знаходимо: $l = 1,87$. При такому значенні l зображення O' точки O в ГОЕ віддалене від сітки на відстань $2l = 3,74$. Зображення O'' точки O' в нижній бічній грані моноблока віддалене від верхньої грані на відстань $2h_1 = 2$ і співпадає з фокусом дзеркального об'єктива F' . Кут децентрування $2u$ в цій схемі визначається за формулою

$$\operatorname{tg} 2u = 1,5h_1 / 2l = 1,5 \operatorname{tg} \delta,$$

тобто не залежить від параметра h_1 і становить $21,9^\circ$. Фокусна відстань f дзеркального об'єктива залежить від кута децентрування децентрування як

$$2,25h_1^2 + (2l + f')^2 = 4f'^2$$

і дорівнює 3,88. Таким чином, дзеркальний об'єктив має відносний отвір 1:2,5 при куті децентрування $2u = 21,9^\circ$.

З рис. 4.11 видно, що мінімальний кут i_{min} падіння променів на нижню поліровану грань моноблока після дифракції на ГОЕ визначається залежністю $\operatorname{tg} i_{min} = l/h_1$ і при відомих значеннях l і h_1 становить $61,9^\circ$. Тому, навіть при використанні скла з малим показником заломлення, на нижній грані моноблока має місце повне внутрішньо відбиття падаючого променя. Однак практично, враховуючи жорсткі умови експлуатації прицілів, на нижню грань лінзового елемента 3 доцільно наносити дзеркальне покриття. При чому, для мінімізації паразитних рефлексів в каналі спостереження навколишнього простору це дзеркальне покриття повинне бути таким же, як і на лінзовому елементі 1.

Розрахунок точності ходу променів в обох варіантах компоновки КП показав, що при розміщенні моноблока збоку зброї ($h_1 = 1$, $h_2 = 3/4$), нанесенні дзеркального покриття на верхню/нижню грань і суміщенні сітки з нижньою/верхньою гранню лінзового елемента 3 гранична паралактична похибка

лінії прицілювання, обумовлена сферичної формою відбиваючої поверхні об'єктива і довільним положенням ока оператора в межах вихідної зіниці прицілу, становить $3\sigma=7,5$ мрад по вертикалі і $3\sigma=0,1$ мрад по горизонталі.

Другий варіант побудови оптичної схеми в три рази перевершує перший в точності, але є в півтора рази довшим. Тому прийняття рішення про достатність цієї точності і необхідних габаритах прицілу слід приймати після моделювання стосовно до конкретного типу зброї і розв'язуваної їм поточної задачі. Якщо при моделюванні використовувати ростову мішень №8 (еквівалентні габаритні розміри 60×160 см²) на дальності 50 м, то її кутові розміри складуть 12×32 мрад. Тому другий варіант побудови оптичної схеми з горизонтальною складовою паралактичної похибки 0,1 мрад (± 5 мм на дальності стрільби 50 м в горизонтальному напрямку) і вертикальної - 7,5 мрад (± 375 мм на дальності стрільби 50 м у вертикальному напрямку) можна вважати прийнятним. Якщо ж результати моделювання покажуть необхідність підвищення точності, то єдиним ефективним методом в обох варіантах побудови схеми є використання асферичною оптики. Зокрема, при використанні параболічної дзеркальної поверхні виду $y^2 = 8,2x$ ($f'=2,05$) в першому варіанті і поверхні виду $y^2 = 15,52x$ ($f'=3,88$) у другому варіанті - лінія прицілювання будується без похибки при переміщенні ока у всьому діапазоні вихідної зіниці.

Моноблочну лінзову схему (рис. 4.11) можна віднести до найбільш перспективних ОЕСС сучасних оптичних прицілів для автоматичної і особистої стрілецької зброї [38]. Проблемним питанням при створенні прицілу на базі цієї схеми є взаємне узгодження діаметру D моноблока і його довжини t . Справа в тому, що параметр D одночасно впливає на габарити, масу, діаметр вихідної зіниці і точність прицілу. Діаметр вихідної зіниці при спостереженні прицільної сітки у вигляді точки є близьким до величини D , але його збільшення, що сприяє умовам спостереження, призводить до погіршення інших трьох характеристик. Маса моноблока при його круглій апертурі визначається за формулою

$$M = 0,25\pi t\phi D^2, \quad (4.42)$$

де t - довжина моноблока, ϕ - питома вага скла.

Похибка кутового положення лінії прицілювання визначається за формулою [197]

$$\delta = 62,5(D/t)^3(n-1)^{-2}, \text{ мрад}, \quad (4.43)$$

де n - показник заломлення матеріалу моноблока.

Обмеживши величину D діапазоном (8 – 33) мм (відповідає діапазону реальних значень діаметра вихідної зіниці існуючих КП) знаходимо вирази для часткових показників якості, які пов'язані з цим параметром:

$$K_2 = K_3 = 1,32 - 0,4D; K_4 = 1,06 - 0,1D^2; K_6 = 0,4D - 0,32; K_8 = 1,01 - 0,03D^3.$$

Вибравши в якості критерію оптимальності максимум функції $K_\Sigma = f(D)$ для вирішення протиріччя між діаметром вихідної зіниці і масою моноблока, отримаємо вираз узагальненого показника у вигляді

$$K_\Sigma = (K_4 + K_6) / 2 = 0,37 + 0,2D - 0,05D^2.$$

Оптимальне значення параметра D визначається функцією

$$\partial K_\Sigma / \partial D = 0,2 - 0,1D_{\text{opt}} = 0.$$

Рішення цього рівняння дає значення $D_{\text{opt}} = 20$ мм.

Для оптимізації діаметра вихідної зіниці з урахуванням похибки кутового положення лінії прицілювання запишемо вираз узагальненого показника для цього випадку

$$K_\Sigma = (K_6 + K_8) / 2 = 0,35 + 0,2D - 0,015D^3.$$

Оптимальне значення параметра D визначається функцією

$$\partial K_\Sigma / \partial D = 0,2 - 0,045D_{\text{opt}}^2 = 0.$$

Рішення цього рівняння дає шукане значення $D_{\text{opt}} = 21,1$ мм.

Для оптимізації діаметра вихідної зіниці з урахуванням габариту знайдемо величину D , виходячи з рівності

$$(K_2 + K_3) / 2 = K_6.$$

Після підстановки в цю формулу виразів для K_2 , K_3 та K_6 маємо $D_{\text{opt}} = 20,5$ мм.

Для оптимізації діаметра вихідної зіниці з урахуванням одночасно маси моноблока і похибки кутового положення лінії прицілювання, запишемо вираз узагальненого показника у вигляді

$$K_{\Sigma} = (K_4 + K_6 + K_8) / 3 = 0,58 + 0,13D - 0,03D^2 - 0,01D^3.$$

Оптимальне значення параметра D визначається функцією

$$\partial K_{\Sigma} / \partial D = 0,13 - 0,06D_{\text{opt}} - 0,03D_{\text{opt}}^2 = 0.$$

Рішення цього рівняння дає шукане значення $D_{\text{opt}} = 13,1$ мм.

З іншого боку, як випливає з (4.42) і (4.43), параметр t також одночасно впливає на масу і точність прицілу і визначає його довжину. Збільшення t сприятливо позначається на точності, але призводить до погіршення двох інших характеристик.

Обмеживши параметр t діапазоном (69 – 200) мм (який відповідає діапазону реальних значень довжини існуючих КП) і умовно прийнявши діаметр моноблока рівним 15 мм, знаходимо вирази для часткових показників якості, які пов'язані з цим параметром

$$K_1 = K_4 = 1,53 - 0,145t;$$

$$K_8 = 1,04 - 342,6t^{-3}.$$

Вибравши в якості критерію оптимальності максимум функції $K_{\Sigma} = f(t)$, для оптимізації довжини моноблока з урахуванням точності і маси, запишемо вираз узагальненого показника у вигляді

$$K_{\Sigma} = (K_{1(4)} + K_8) / 2 = 1,3 - 0,073t - 171,3t^{-3}.$$

Оптимальне значення параметра t визначається функцією

$$\partial K_{\Sigma} / \partial t = -0,073 + 513,9t_{\text{opt}}^{-4} = 0.$$

Рішення цього рівняння дає шукане значення $t_{\text{opt}} = 92$ мм.

Для усунення протиріччя між точністю з одного боку і масою та довжиною моноблока з іншого боку представимо вираз K_{Σ} у вигляді:

$$K_{\Sigma} = (K_1 + K_4 + K_8) / 3 = 1,37 - 0,097t - 114,2t^{-3}.$$

В цьому випадку оптимальне значення параметра t визначається функцією

$$\partial K_{\Sigma} / \partial t = -0,097 + 342,6t^{-4} = 0,$$

і рішення цього рівняння дає шукане значення $t_{\text{opt}} = 77$ мм.

В табл. 4.5 у другому рядку представлені можливі варіанти оптимальних значень діаметра моноблока як компромісу між діаметром вихідної зіниці, масою, габаритами і точністю моноблока; в третьому рядку тут же дано варіанти оптимальних значень довжини моноблока як компромісу між точністю, масою і габаритами моноблока.

Таблиця 4.5

Оптимальні значення діаметра і довжини моноблочного КП

	Маса	Габарити	Точність	Маса + точність	Маса + габарити
Діаметр зіниці	20 мм	20,5 мм	21,1 мм	13,1 мм	-
Точність	92 мм	92 мм	-	-	77 мм

При розробці моноблочного прицілу для конкретного виду зброї в першу чергу необхідно встановити пріоритет (ваговий коефіцієнт) кожної характеристики і визначити, компроміси між якими характеристика слід усувати. Потім, користуючись таблицею, вибирати діаметр і довжину моноблока.

Наприклад, для знаходження компромісів між діаметром вихідної зіниці, точністю і масою, оптимальна конструкція моноблочного прицілу повинна мати такі характеристики:

- діаметр - 20 мм (12×16 мм при прямокутній апертурі з відношенням сторін 3: 4);
- довжина - 92 мм.

При цьому інші характеристики моноблока зі скла марки К8 ($n=1,5183$; $\rho=2,52$ г/см³) складуть:

- маса - 72 г (44,5 г при прямокутній апертурі);

- гранична паралактична похибка 2,4 мрад;
- діаметр вихідного зіниці - 20 мм.

4.2.2 Телескопічні ОЕСС

При створенні моноблочного ТП на базі телескопічної лінзи необхідно вирішити комплексну задачу узгодження технічних параметрів прицілу з вимогами, що формуються контекстом поточної задачі [198]. Як оптичний елемент в моноблочному виконанні товста телескопічна лінза [199, 200] забезпечувала б максимальну надійність при невисокій собівартості. Однак, для створення ТП на основі телескопічної лінзи потрібно створити відповідні розрахункові методики.

Умова телескопічності товстої лінзи описується відомим рівнянням [36]

$$d = (r_1 - r_2) / (1 - g), \quad (4.44)$$

де d - товщина лінзи по оптичній осі, r_1 - радіуси кривизни заломлюючих поверхонь і g - величина, зворотна показнику заломлення скла n .

При цьому видиме збільшення визначається відношенням

$$\Gamma^x = r_1 / r_2. \quad (4.45)$$

При заданих габаритах і збільшенні моноблока, відомому сорті скла рівняння (4.44) і (4.45) визначають відсутні конструктивні параметри лінзи:

$$r_1 = d(1 - g) / (1 - 1 / \Gamma^x), \quad (4.46)$$

$$r_2 = d(1 - g) / (\Gamma^x - 1). \quad (4.47)$$

З метою створення допоміжного оптичного каналу для введення в поле зору візирної сітки, на першу заломлюючу поверхню лінзи 1 радіуса r_1 можна нанести світлоподільник (рис. 4.12).

При цьому в зворотному ході променів ця поверхня стає дзеркальним об'єктивом, фокусна відстань якого дорівнює $r_1/2$. Віддалення s точки F'_c , в якій має розміщуватись центр перехрестя візирної сітки, від дзеркального об'єктива визначається відомою формулою Гауса

$$s = r_1 / (2 - r_1 / f'_1), \quad (4.48)$$

де f'_1 - фокусна відстань першої заломлюючої поверхні лінзи, що знаходиться за відомою формулою геометричної оптики [36]:

$$f'_1 = r_1 / (1 - g). \quad (4.49)$$

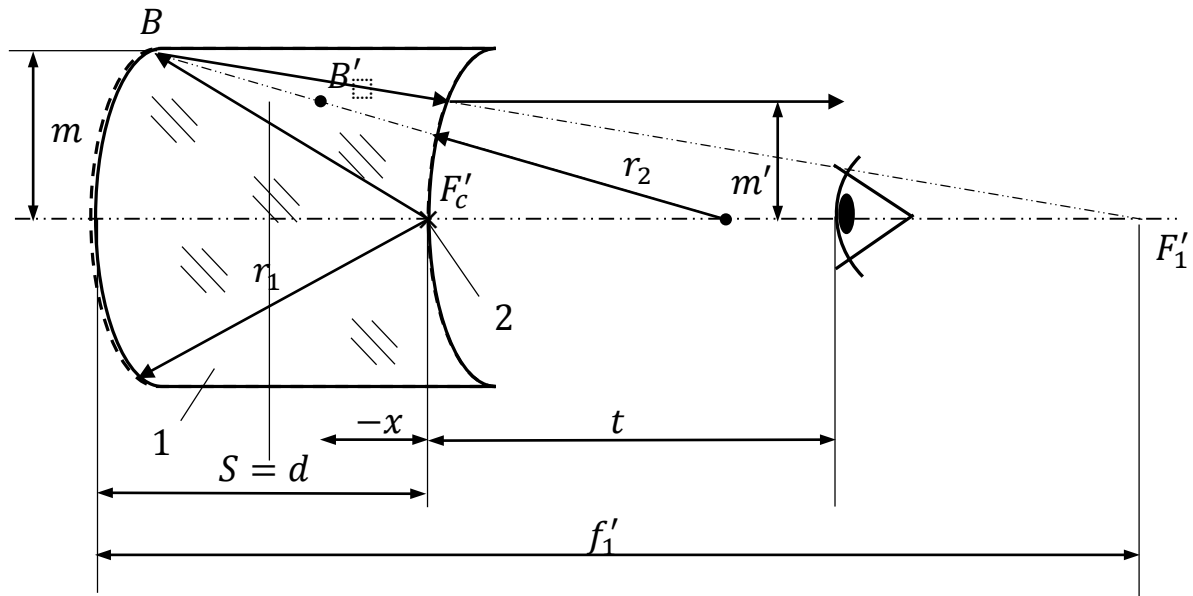


Рис. 4.12. Оптична схема моноблочного ТП: 1 – лінза, 2 – візирная сітка

Після підстановки (4.49) в (4.48) маємо

$$s = r_1 / (1 + g). \quad (4.50)$$

Для того, щоб ввести сітку 2 у допоміжний оптичний канал, її можна поєднати з другої заломлюючої поверхні лінзи, тобто $s = d$. Із (4.45) і (4.46) знаходимо

$$\Gamma^x = (1 + g) / 2g. \quad (4.51)$$

З (4.51) випливає, що для досягнення великого збільшення необхідно виготовляти лінзу зі скла з високим показником заломлення. Зокрема, при використанні скла марки ТФ10, у якого $n_e = 1,8138$, отримуємо $\Gamma^x = 1,41$.

Практично, сітка наноситься на поверхню у вигляді світловідбивних штрихів, які освітлюються природним світлом через світлоподільник і бічну поліровану поверхню моноблока або штучним джерелом через торець лінзи. Еквівалентна фокусна відстань допоміжного каналу, значення якого f'_3 необхідно знати для розрахунку розмірів сітки, визначається залежністю

$$d = f'_3[(1 + d(1 - \vartheta)/r_2)],$$

або, враховуючи (4.45) й (4.46)

$$f'_3 = d / \Gamma^x. \quad (4.52)$$

В телескопічній системі Галілея вихідною зіницею є зіниця ока, а її зображення в зворотному ході променів - вхідним. Вхідним вікном і діафрагмою поля зору є оправа об'єктива, а її зображення через окуляр є вихідним вікном системи.

Тобто положення вихідного вікна ТП визначається точкою B' , яка є зображенням краю оправы (точка B на рис.4.12) через лінзу. Половина поля зору β ТП в просторі зображень визначається залежністю

$$\operatorname{tg} \beta' = m' / (t - x),$$

де $2m'$ - лінійна апертура вихідного вікна; t - віддалення ока від ТП і x - віддалення вихідного вікна від другої заломлюючої поверхні. Віддалення x визначається відомою формулою Гаусса

$$\vartheta / x - 1 / d = (\vartheta - 1) / r_2,$$

а m' пов'язано з діаметром лінзи $2m$ габаритним співвідношенням

$$m' = m(r_2 - x) / (r_2 - d). \quad (4.53)$$

Відповідно, половина поля зору ТП в просторі предметів β визначається як

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \beta' / \Gamma^x. \quad (4.54)$$

Підставляючи в (4.46), (4.47), (4.52), (4.53) і (4.54) відомі значення n і Γ^x отримуємо робочі формули для габаритного розрахунку моноблочного ТП

$$\begin{aligned} r_1 &= 1,543d; \quad r_2 = 1,094d; \quad f'_3 = 0,709d; \quad m' = 0,709m; \\ \operatorname{tg} \beta &= 0,5028m / (t + 0,391d). \end{aligned} \quad (4.55)$$

Кутова сферична аберація моноблочного ТВ $(\delta g')_{\text{сф}}$ визначається відомою формулою [199]

$$(\delta g')_{\text{сф}} = 0,5(m / r_1)^3 (d / r_1) \vartheta (1 - \vartheta)^2. \quad (4.56)$$

Підставляючи сюди відомі значення n і Γ^x і беручи до уваги (4.55), отримуємо робочу формулу для оцінки кутової сферичної аберації ОЕСС

$$(\delta g')_{cf} = 0,0098(m/d)^3.$$

Графік залежності $(\delta g')_{cf}$ від товщини лінзи при $m=15$ мм наведено на рис. 4.13. З нього випливає, що при діаметрі лінзи до 30 мм і її довжині не менше 50 мм, кутова сферична аберація є сумірною з роздільною здатністю ока, і нею можна знехтувати.

Вираз для кутового хроматизму ТП $(\delta g')_{xp}$ можна отримати диференціюванням виразу (4.56) за параметром n

$$(\delta g')_{xp} = \partial(\delta g')_{cf} / \partial n = -0,5(m/r_1)^3(d/r_1)g^2(1-4g+3g^2)\Delta n, \quad (4.57)$$

де Δn - середня дисперсія скла, яка у ТФ10 становить 0,03232 [201].

Підставляючи в (4.57) значення n , Δn і беручи до уваги (4.55), отримуємо робочу формулу для оцінки кутового хроматизму ТП

$$(\delta g')_{xp} = 0,000255(m/d)^3.$$

При $m=15$ мм і d , що змінюється в діапазоні від 50 мм до 100 мм, кутовий хроматизм не перевищує кутової мінuti і ним також можна знехтувати.

Паралактична похибка перехрестя візирної сітки визначається в ході розрахунку променя, що виходить з точки F'_c , за стандартним алгоритмом [202].

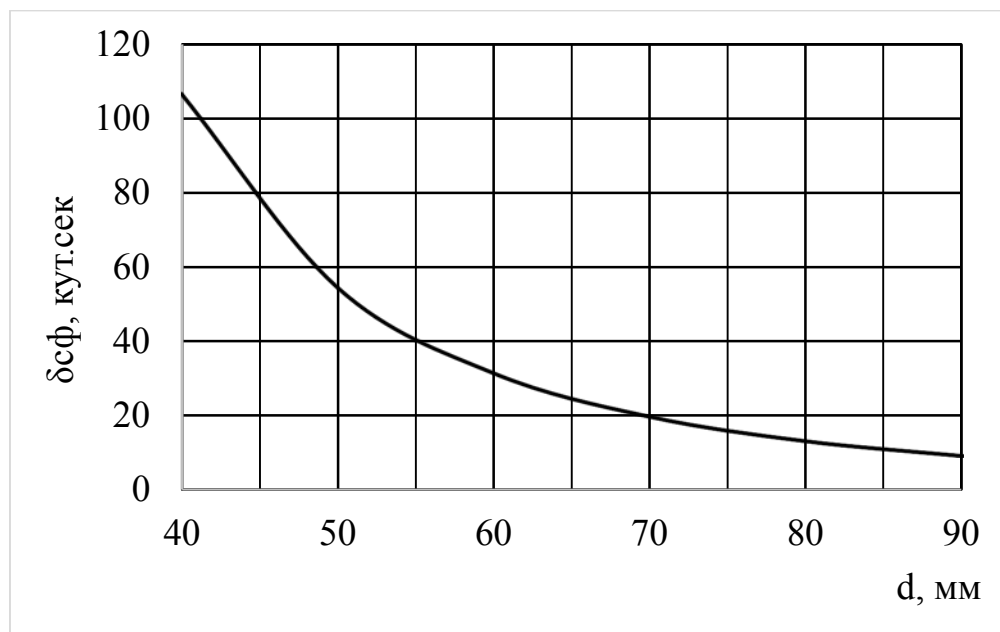


Рис. 4.13. Залежність сферичної аберації від товщини лінзи

На рис. 4.14 представлені графіки залежності кутової неузгодженості ρ між лінією візування сітки і лінією спостереження предмета в залежності від координати m для трьох значень d .

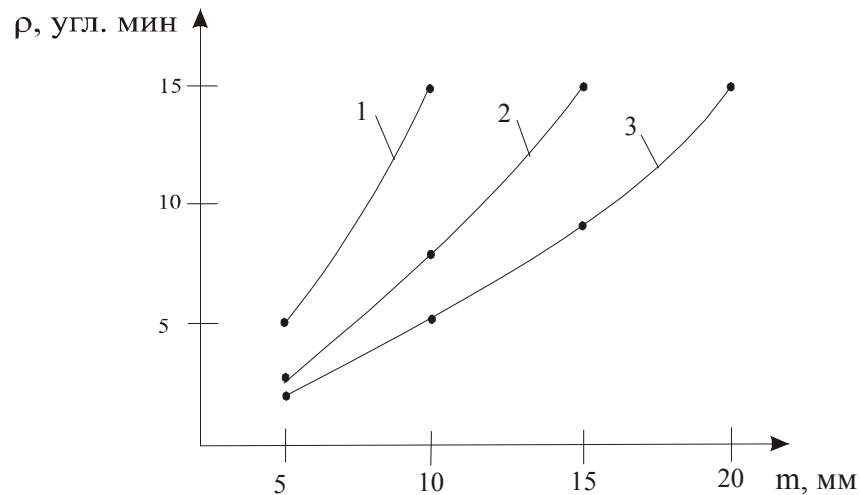


Рис. 4.14. Кутова неузгодженість між лінією візування сітки і лінією спостереження: 1 - $d=50$ мм; 2 - $d=75$ мм; 3 - $d=100$ мм

Аналіз цих графіків дозволяє зробити наступні висновки. При обмеженні неузгодженості ρ значенням $17,2$ кут.мін (5 мрад) лінійна апертура ТП не повинна перевищувати:

- 40 мм при довжині моноблока 100 мм;
- 30 мм при довжині моноблока 75 мм;
- 20 мм при довжині моноблока 50 мм.

При віддаленні ока від моноблока на 75 мм така лінійна апертура забезпечує поля зору 2β , відповідно, $10,0^\circ$; $8,2^\circ$ і $6,1^\circ$.

Зона, в межах якої спостерігач може переміщати око, не втрачаючи з поля зору зображення візирної сітки, відповідає лінійній апертурі $2m'$ вихідного вікна, яка обчислюється за формулами (4.53) або (4.55).

Будь-який ТП містить дві функціональні частини - канал спостереження цілі і канал візування прицільної сітки. Телескопічна лінза безпосередньо забезпечує реалізацію каналу спостереження цілі. Створення каналу візування прицільної сітки для введення її колімованого зображення в поле зору має мінімально

ускладнювати конструкцію і при цьому забезпечувати прийнятну точність. Доцільно для цього використовувати першу поверхню заломлення лінзи (рис. 4.15), сформувавши на ній світлоподільне покриття, а прицільну сітку виконати дзеркальною на другій заломлюючій поверхні [203].

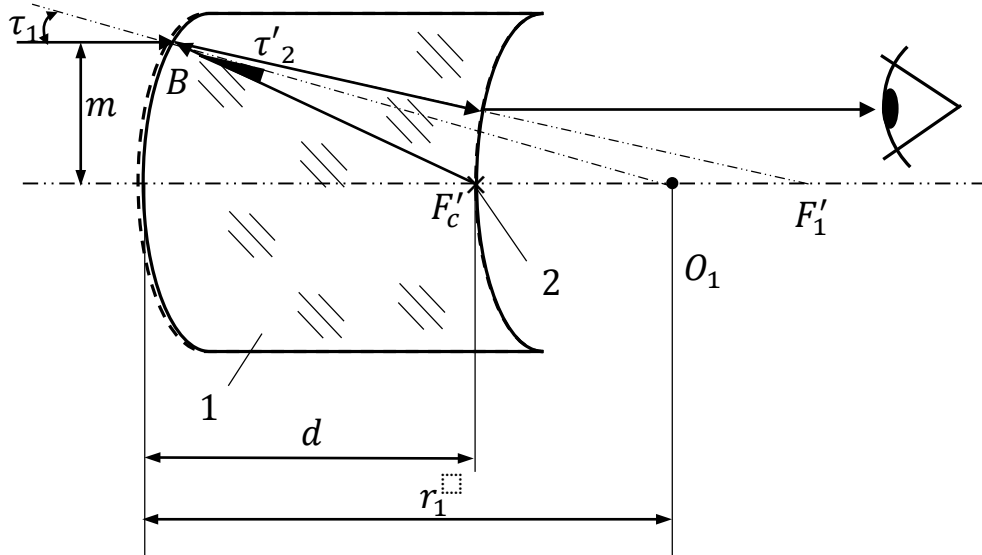


Рис. 4.15. Моноблочний ТП у вигляді центрованої лінзи: 1 - лінза, 2 - сітка

У найпростішому випадку сітка може освітлюватися природним світлом через світлоподільник і бічну поверхню лінзи, яка виконана полірованою в області, прилеглої до сітки. При цьому перша поверхня лінзи працює одночасно на заломлення в каналі спостереження цілі і на відображення в каналі візування прицільної сітки. Точка F'_c , в якій розташовується центр дзеркальної прицільної сітки, і фокус першої заломлюючої поверхні F'_1 є пов'язаними через дзеркальну поверхню

$$d = r_1 / (1 + \mathcal{G}_2). \quad (4.58)$$

Спільне рішення (4.46) і (4.47) дає результат $\Gamma^x = (1 + \mathcal{G}_2) / 2\mathcal{G}_2$.

З останньої формули випливає, що для досягнення великого збільшення необхідно виготовляти лінзу зі скла з мінімальним значенням \mathcal{G}_2 . Зокрема, при використанні скла марки ТФ10, у якого $\mathcal{G}_2 = 0,5513$ [201], отримуємо $\Gamma^x = 1,41$.

Підставляючи ці значення в (4.46) і приймаючи умову нормування $d=1$, знаходимо остаточні вирази для радіусів кривизни поверхонь: $r_1 = 1,5513$; $r_2 = 1,1025$.

Оскільки прицільна сітка багато в чому визначає ефективність ТП, необхідно ретельно оцінити її властивості, що визначають основні характеристики ТП в цілому. Важливими для виконання прицілювання параметрами є форма прицільної сітки, яскравість її зображення і точність узгодження з каналом спостереження цілі.

Яскравість зображення прицільної сітки повинна бути адаптивно регульованою в залежності від освітленості ФЦО. Ця вимога в значній мірі реалізується запропонованою конструкцією ТП. Однак, в умовах низької освітленості або при інших несприятливих обставинах реальної обстановки яскравість зображення прицільної сітки може бути занадто малою. Для усунення цього недоліку вводять в канал візування прицільної сітки додаткове підсвічування. Як джерело світла доцільно використовувати червоний світлодіод ($\lambda_{\max} \approx 0,68$ мкм), а замість світлоподільного покриття - спектроподільне. При цьому внаслідок зменшення коефіцієнта відбиття першої поверхні телескопічної лінзи корисне пропускання каналу спостереження цілі збільшиться в k разів

$$k = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} k_{\lambda} y_{\lambda} d\lambda}{\tau \int_0^{\infty} k_{\lambda} y_{\lambda} d\lambda},$$

де τ_{λ} - спектральний коефіцієнт пропускання спектроподільного покриття; y_{λ} - спектральна щільність потоку випромінювання цілі; k_{λ} - спектральний коефіцієнт відносної видимості ока; τ - коефіцієнт пропускання нейтрального світлоподільника.

З огляду на те, що спектроподільне (інтерференційне) покриття відбиває в дуже вузькому спектральному діапазоні, збільшення коефіцієнта пропускання каналу спостереження цілі може досягати (20 – 30)%. Зокрема, при використанні спектроподільника $\{(90\text{IE}x3)(41\text{IE}x3)\}[x9]\{90\text{IE}x3)(41\text{IE}x1,5)$ для $\lambda_{\max}=0,68$ мкм

замість нейтрального світлоподільника 44Р.43Р.44Р збільшення пропускання складе 22,8% .

Точність узгодження каналів спостереження і візування сітки залежить від аберацій в оптичній системі ТП. Принциповою перевагою конструкції на рис.4.16 є часткове виправлення кривизни поля сферичного дзеркала, утвореного світлоподільником, за рахунок розміщення об'єкта (прицільної сітки) на сферичній поверхні. При оцінці паралактичної неузгодженості ρ між лінією візування перехрестя прицільної сітки і лінією спостереження цілі, обумовленої сферичною аберацією, можна виходити з таких міркувань. Кут τ_1 між нормаллю до першої заломлюючої поверхні в точці B і променем від віддаленої цілі, що йде паралельно оптичній осі на висоті m , визначається залежністю

$$\sin \tau_1 = m / r_1. \quad (4.59)$$

Після заломлення цей промінь утворює з нормаллю кут τ_1'

$$\sin \tau_1' = \mathcal{G}_2 \sin \tau_1 \quad (4.60)$$

Промінь від перехрестя прицільної сітки утворює з нормаллю в точці B кут τ_2'

$$\tau_2' = \arctg[\sin \tau_1 (\cos \tau_1 - 0,3554)] - \tau_1. \quad (4.61)$$

Очевидно, що модуль різниці кутів τ_1' і τ_2' характеризує шукану величину - в просторі цілей цій різниці відповідає неузгодженість ρ між лініями візування і спостереження, що визначається формулою

$$\rho = (\tau_1' - \tau_2') / \mathcal{G}_2 = 1,8138 (\tau_1' - \tau_2') \quad (4.62)$$

Графік залежності $\rho=f(m)$ при $d=1$ наведено на рис. 4.16 (крива 1). З цього графіка видно, що якщо обмежити допустиму неузгодженість середньоквадратичним розсіюванням зброї, яке становить для більшості видів стрілецької зброї 3 мрад [204], то параметр m не повинен перевищувати 0,3.

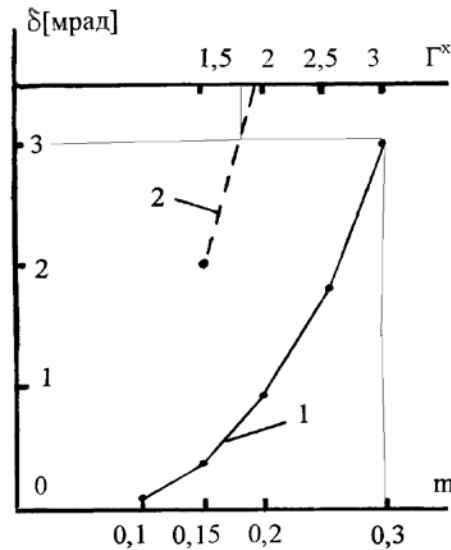


Рис. 4.16. Графіки залежностей паралакса:

1 - від висоти осьового променя m ; 2 - від збільшення Γ^x

Особливості розміщення прицілу на стрілецькій зброї обмежують його довжину величиною 100 мм, а діаметр - 30 мм. Тобто $m = 0,15$ і згідно з графіком гранична неузгодженість не перевищить 0,4 мрад.

Аналіз складових цієї неузгодженості показує наступне. Неузгодженість лінії спостереження цілі визначається цілком сферичною аберацією телескопічної лінзи і обчислюється за формулою [199]

$$(\delta g')_{cf} = 500 (m / r_1)^3 (d / r_1) \mathcal{Q}_2 (1 - \mathcal{Q}_2)^2, \text{ мрад.} \quad (4.63)$$

При $m=0,15$ гранична паралактична похибка становить лише 0,03 мрад і нею можна знехтувати. Отже, неузгодженість між лініями спостереження цілі і візування прицільної сітки залежить тільки від сферичної аберації в каналі прицільної сітки.

При оцінці паралактичної неузгодженості ρ_λ між лінією візування перехрестя прицільної сітки і лінією спостереження цілі, обумовленої хроматизмом, будемо виходити з таких міркувань. Оскільки хроматизм обумовлено градієнтом показника заломлення Δn_2 , який у скла ТФ10 для довжин хвиль λ_c і λ_e становить - 0,01524, а для λ_F і λ_e 0,01708 [201], то часткова похідна $\partial \rho / \partial n_2$ визначає ρ_λ . Взявши похідну від (4.62) з урахуванням (4.60) і (4.61) і переходячи до кінцевих значень,

знаходимо вираз для спектрального коефіцієнта відбиття ρ_λ при $m=0,15$

$$\rho_\lambda = -53,4\Delta n_2 + 0,4, \text{ мрад.}$$

Звідси отримуємо $\rho_{\lambda\max}=1,2$ мрад при λ_c . Таким чином, паралактична неузгодженість через хроматизм в 3 рази перевищує неузгодженість, обумовлену сферичною аберацією.

Аналіз складових цієї неузгодженості показує, що неузгодженість лінії спостереження цілі визначається цілком хроматизмом телескопічної лінзи, який можна знайти, обчисливши $\partial(\delta g')_{cf} / \partial n_2$, мрад.

При $\Delta n_2=-0,01524$ граничне значення $(\delta g')_{xp}$ не перевищить 0,04 мрад і хроматизмом можна знехтувати. Таким чином, неузгодженість між лініями спостереження цілі і візування прицільної сітки залежить тільки від хроматизму в каналі прицільної сітки. Однак при цьому треба мати на увазі, що прицільна сітка освітлюється природним світлом, інтенсивність якого в червоній області є меншою, ніж в зеленій. Око також менш чутливе до червоних променів в порівнянні з зеленими. Отже, практично, хроматизм несуттєво буде позначатися на точності прицілювання.

Моноблочний ТП в такому конструктивному виконанні має характеристики, наведені в таблиці 4.6 (стовпець 2).

Таблиця 4.6

Характеристики ТП у осесиметричному та децентрованому варіантах

Характеристика	Осесиметрична схема	Децентрована схема
1	2	3
Збільшення, крат	1,41	1,6
Довжина моноблока, мм	100	100
Діаметр моноблока, мм	30	30
Зона спостереження перехрестя сітки, мм	21,3	18,7
Поле зору при віддаленні ока від ТП на 75 мм, град:		
- для нерухомого ока	7,6	6,1
- при зсуві ока в зоні спостереження сітки	15	12,2
Маса, г	417	417

1	2	3
Паралакс при зсуві ока в зоні спостереження сітки, мрад	0,4	2,8
Фокусна відстань в каналі сітки, мм	71	48
Радиуси кривизни поверхонь r_1/r_2	155,12 / 110,25	119,65 / 74,78
Віддалення сітки d_1 , мм	100	76,94

Очевидно, що в обмеження збільшення значенням $1,41^x$ не може в повній мірі задовольнити широкого спектру задач спостереження. Тому дослідимо можливість досягнення більш високого Γ^x , зберігаючи габарити моноблока і матеріал.

Підставивши в (4.58) вираз (4.57) для r_1 , після перетворень маємо

$$d_1 = 0,2892 \Gamma^x (\Gamma^x - 1). \quad (4.64)$$

Аналіз цієї залежності показує, що при $\Gamma^x > 1,41$ параметр $d_1 < 1$, а це означає, що сітка повинна знаходитись всередині моноблока. Можливий варіант конструктивного виконання оптичної схеми наведено на рис. 4.17. Тут на відміну від схеми на рис. 4.15 телескопічна лінза виконана децентрованою, джерелом світла є світлодіод, а замість світлоподільника використовується спектроподільник. При цьому, по-перше, збільшується яскравість зображення сітки, по-друге, виключаються всі проблеми, пов'язані з хроматизм в каналі прицільної сітки

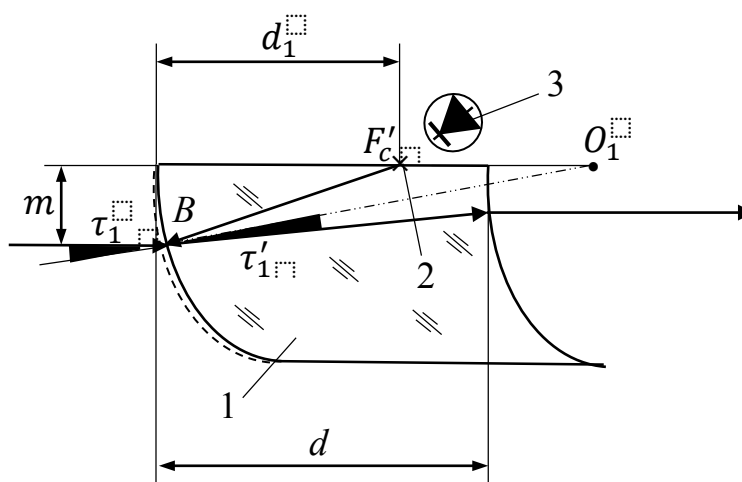


Рис. 4.17. Моноблочний ТП у вигляді децентрованої лінзи: 1 – лінза, 2 – сітка, 3 – світлодіод

Підставляючи значення $d=1$ і $\vartheta_2=0,5513$ в (4.57), знаходимо вирази для інших конструктивних параметрів моноблока: $r_1 = 0,4487 \cdot \Gamma^x / (\Gamma^x - 1)$; $r_2 = 0,4487 / (\Gamma^x - 1)$.

Віддалення сітки d_1 в цьому випадку визначається з умови суміщення променя, який виходить від цілі і перетинає першу поверхню лінзи на висоті m в точці B , з відбитим променем, який спрямований з точки F'_c в точку B

$$d_1 = r_1 - (r_1^2 - m^2)^{1/2} - m / \operatorname{tg}(\tau_1 + \tau'_1),$$

де кути τ_1 і τ'_1 визначаються за формулами (4.59) і (4.60).

Оцінку паралактичної неузгодженості проведемо за тією ж методикою, що і для попереднього варіанту. На рис. 4.16 (крива 2) показано графік залежності $\rho=f(\Gamma^x)$ при $d=1$, $m=0,15$ і $\mu_2=0,5513$. З аналізу цього графіка можна зробити висновок, що при допустимій неузгодженості 3 мрад збільшення такого децентрованого моноблока не повинно перевищувати 1,6 крат. Характеристики моноблочного ТП з децентрованою лінзою наведені в таблиці 4.6 (стовпець 3).

4.3 Узгодження полів зору в ОЕСС з оптичним каналом

Комплексування оптичних та оптико-електронних каналів як правило здійснюється не цифровою обробкою зображень, а оптичним шляхом – в оптичний канал світло- або спектроподільником вводиться зображення оптико-електронного каналу [205, 206]. В [207] запропоновано покращення інформативності візирної головки (ВГ) авіаційного стрілецького прицілу (АСП) шляхом комплексування з електронним індикатором. АСП відноситься до особливого класу систем відображення інформації індивідуального користування. Це зв'язано, по-перше, із специфікою розміщення ВГ на приладовій дошці літального апарату - ВГ повинна займати мінімум об'єму в центральній частині приладової дошки. По-друге, з особливостями взаємодії пілота з ВГ - віддалення очей від напівпрозорого відбивача повинне бути не менше 500 мм [208], а переміщення голови по вертикалі

для спостереження прицільної марки на кутах візування допустимі тільки вниз і мають бути мінімальними (переміщення вгору обмежуються ліхтарем кабіни літального апарату). Запропоновано замінити ВГ на індикатор на лобовому склі (ІЛС) «Зрачок-2» [209], в якому електронно-променева трубка замінюється рідкокристалічним дисплеєм.

Об'єktiv такої ВГ має відповідати умові [210]

$$0,1A\sqrt{f'}\operatorname{tg}\beta \leq 0,24 \quad (4.65)$$

де $A = D / f'$ - відносний отвір об'єктиву; β - половина поля зору, яка визначається по формулі

$$\operatorname{tg}\beta = d/2f', \quad (4.66)$$

де d - діагональ матриці.

Отже зв'язок між діаметром вихідної зіниці об'єктиву і його фокусом:

$$D \leq 0,1076 f'^{3/2}. \quad (4.67)$$

Основною проблемою при такій модернізації є раціональна організація інформаційного поля зору в діапазоні кутів візування ІЛС. Доцільно інформаційне поле розділити на дві горизонтальні ділянки (рис. 4.18), що перекриваються (перекриття 2°). Центри верхньої 1 і нижньої 2 ділянок полів зору позначені відповідно O_v і O_n . Тобто вертикальна складова β_v інформаційного поля зору, сформованого на рідкокристалічному індикаторі, повинна бути 13° .

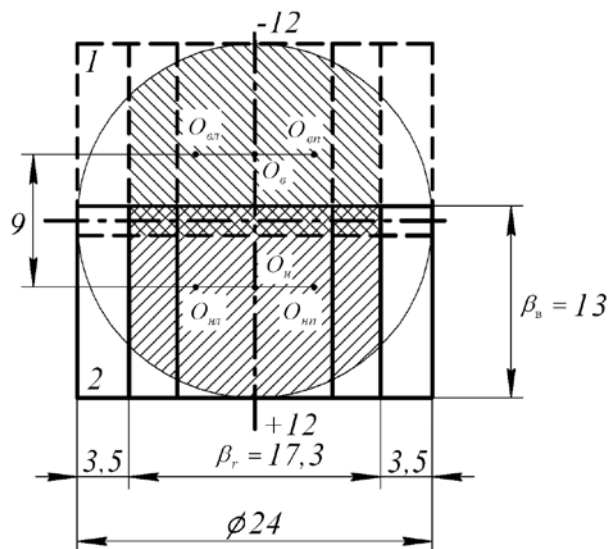


Рис. 4.18. Інформаційне поле зору ВГ: 1 - верхня ділянка поля зору (пунктир), 2 - нижня ділянка поля зору; розмірності в градусах

Звідси витікає необхідність сканування поля зору по вертикалі на величину 9° . При стандартному форматі рідкокристалічного дисплея 3:4 горизонтальний розмір β_{Γ} інформаційного поля зору має бути $17,3^\circ$, а половина загального поля зору β має бути рівним $10,83^\circ$. З урахуванням цього, з (4.66) знаходимо: $f' = 116,6$ мм. Підставляючи знайдене значення f' в (4.67) знаходимо: $D \leq 135,5$ мм. Накладаючи на цю умову габаритні обмеження, приймаємо $D = 116,6$ мм, тобто $A = 1:1$. Як видно з рис. 4.18, горизонтальний розмір інформаційного поля β_{Γ} не перекриває діапазон 24° - різниця з кожного боку складає по $3,35^\circ$. Тобто необхідне сканування поля зору по горизонталі на величину $\pm 3,35^\circ$. Центри верхньої лівої і правої ділянок поля зору на рис. 4.18 відповідно позначені $O_{\text{вл}}$ і $O_{\text{вп}}$, а центри нижньої лівої і правої ділянок поля зору позначені відповідно $O_{\text{нл}}$ і $O_{\text{нп}}$ [207]. Таким чином, завдання технічної реалізації комплексування інформації в АСП зводиться до створення комбінованої ВГ з внутрішнім скануванням. На рис. 4.19 представлена принципова оптична схема такої ВГ.

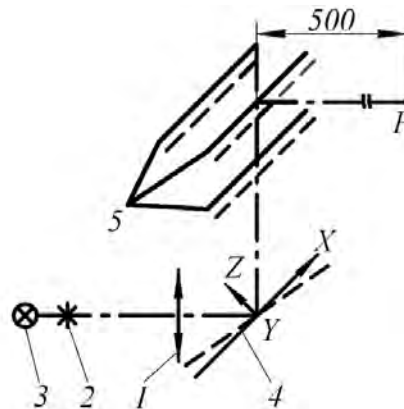


Рис. 4.19. Принципова оптична схема комбінованої ВГ (позначення дані в тексті)

До складу оптичної схеми входять: об'єктив 1, у фокальній площині якого встановлений рідкокристалічний дисплей 2 з джерелом світла 3, дзеркало сканування 4 і напівпрозорий рухомий відбивач 5.

При прямокутній формі поля зору апертура вихідної зіниці об'єктиву теж може мати прямокутну форму, тобто об'єктив повинен мати розміри у перетині 82×82 мм². Дзеркало сканування 4 повинне займати два фіксовані положення при повороті навколо осі Y (вісь перпендикулярна площині креслення): кути нахилу до оптичної осі об'єктиву $45 \pm 2,25^\circ$. При обертанні навколо осі X (вісь лежить в

площині креслення перпендикулярно нормалі Z до дзеркала або співпадає з оптичною віссю об'єктиву) дзеркало сканування 4 займає три фіксовані положення: 0° і $\pm 3,35^\circ$. Для того, щоб виключити переміщення голови вгору при спостереженні перехрестя прицільної марки на максимальному куті візування вниз, напівпрозорий відбивач має бути віддалений від оптичної осі об'єктиву на 81 мм [207].

При такій оптичній схемі віддалення очей спостерігача (на рис. 4.19 точка спостереження позначена буквою P) від об'єктиву при нижньому положенні відбивача досягає 637 мм і миттєве поле зору спостерігача (частина поля зору, що спостерігається двома очима при фіксованому положенні голови) при середній базі очей 66 мм складає $7,15^\circ \times 13^\circ$. На рис. 4.20, а) положення цього миттєвого поля зору при куті нахилу $42,75^\circ$ дзеркала сканування показане пунктиром і позначене цифрою I [207].

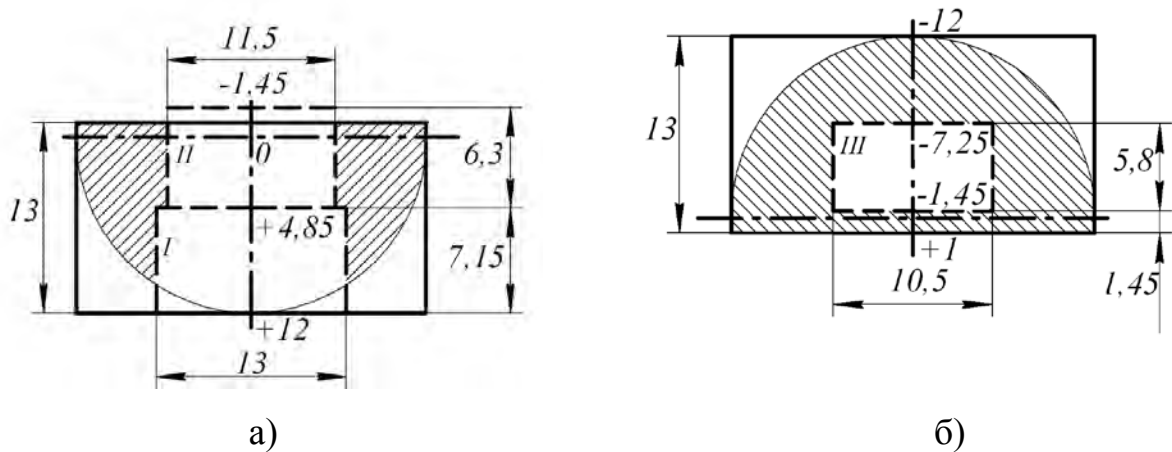


Рис. 4.20. Положення миттєвих полів зору: розмірності в градусах, зони невидимості заштриховані

Для того, щоб виключити переміщення голови вгору при спостереженні перехрестя прицільної марки на куті візування $+4,85^\circ$, напівпрозорий відбивач має бути віддалений від оптичної осі об'єктиву на 171 мм. На рис. 4.20, а) зліва положення цього миттєвого поля зору показане пунктиром і позначене цифрою II. Повороти дзеркала сканування навколо осі X на кут $\pm 3,35^\circ$ практично не впливають на положення меж миттєвого поля зору. Як видно з рис. 4.20, сумарне миттєве поле зору перекриває на $0,45^\circ$ вертикальну складову нижньої ділянки поля зору, тобто

вертикальні переміщення голови виключені. Миттєве поле зору не перекриває горизонтальну складову нижньої ділянки поля зору (зона невидимості $\pm 6,25^\circ$), тому переміщення голови по горизонту складуть ± 79 мм [207].

Для того, щоб виключити переміщення голови при спостереженні перехрестя прицільної марки на куті візування $-1,45^\circ$ при куті нахилу дзеркала $47,25^\circ$, напівпрозорий відбивач повинен бути віддалений від оптичної осі об'єктиву на 240 мм. На рис. 4.20, б) положення цього миттєвого поля зору показане пунктиром і позначене цифрою III. Як видно з рисунку, миттєве поле зору не перекриває вертикальну складову верхньої ділянки поля зору, тому потрібні переміщення голови по вертикалі складуть: вгору 20 мм при візуванні кута $+1^\circ$ вниз і 67 мм вниз при візуванні максимального кута вгору. Миттєве поле зору також не перекриває горизонтальну складову верхньої ділянки поля зору (зона невидимості $\pm 6,75^\circ$), тому можливі переміщення голови по горизонту складуть ± 95 мм [207].

Висновки до розділу 4

1. Розроблено новий метод узгодження основних параметрів вхідного блоку інформаційного (спектрального) каналу, які визначають просторові та енергетичні характеристики ОЕСС. Застосування цього методу дозволяє обрахувати необхідні для досягнення заданого контрасту зображення значення діаметру вхідної зіниці, фокусної відстані об'єктива та порогової освітленості ПВ.

2. Розроблено новий метод узгодження вхідних блоків двоканальних ОЕСС, побудованих за коаксіальною схемою, що забезпечує відсутність паралаксу. В основу методу покладено показник успішності виконання завдання *TTP*, який дозволяє найбільш адекватно прогнозувати ефективність функціонування ОЕСС. Узгодження діаметрів вхідних зіниць виконується шляхом максимізації показника *TTP* при зміні радіус кружка *E_{pi}* відносно розміру пікселя МПВ.

3. Розроблено метод узгодження діаметру моноблока і його довжини для однієї з найдосконаліших моноблочних схем коліматорних оптичних прицілів для автоматичної і особистої стрілецької зброї. Як приклад розраховано оптимальну

схему, яка при діаметрі 20 мм (12×16 мм при прямокутній апертурі з відношенням сторін 3: 4) й довжині 92 мм забезпечує паралактичну похибку 2,4 мрад та масу 72 г (44,5 г при прямокутній апертурі) для скла марки К8.

4. На підставі проведених розрахунків запропоновані два варіанти моноблочних коліматорних прицілів з підвищеною точністю прицілювання. Приціл з двох оптичних деталей з різним показником заломлення, склеєних по площині, забезпечує лінійну апертуру вихідної зіниці прицілу 0,276, при паралаксі 3 мрад. Моноблочний коліматорний приціл з двох оптичних деталей з різним показником заломлення, склеєних по сферичній поверхні, при такій же лінійній апертурі вихідної зіниці і масі забезпечує паралакс 1,25 мрад.

5. Запропоновано методику габаритного розрахунку і узгодження параметрів телескопічного прицілу в моноблочному виконанні. Таке виконання вирішує проблеми запотівання внутрішніх оптичних поверхонь при перепадах температури та розюстування при жорстких умовах експлуатації ОЕСС. Показано, що паралактична неузгодженість між лініями візування і спостереження залежить в основному від хроматизму в каналі прицільної сітки. Запропоновано схему децентрованого моноблока, в якому при неузгодженості 3 мрад збільшення може досягати 1,6 крат порівняно з 1,4 крат для вісесиметричної схеми.

6. Запропоновано спосіб модернізації авіаційного стрілецького прицілу за рахунок комплексування інформаційних каналів на базі ІЛС типу «Зрачок-2» і комбінованої ВГ з РК індикатором, який при допустимому об'ємі забезпечує раціональну організацію інформаційного поля зору в діапазоні кутів візування.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЕСС

Даний розділ присвячено вдосконаленню засобів експериментального визначення основних характеристик спектральних каналів ОЕСС.

Завершальним етапом наскрізної технології створення ОЕСС є розробка експериментальних методів визначення основних характеристик ОЕСС. Виходячи з традиційних уявлень про вимірювальні методи ці характеристики доцільно розділити на просторові та енергетичні. Просторові характеристики ОЕСС значною мірою визначаються постійними параметрами об'єктива та МПВ – фокусною відстанню, розміром, кількістю та конфігурацією пікселів, які практично не змінюються в процесі роботи. Натомість енергетичні характеристики залежать від зовнішніх параметрів, які можуть суттєво змінюватись, і точне значення яких не є відомим заздалегіть. Для ОЕСС, як систем дистанційного спостереження, ефективність функціонування насамперед залежить від енергетичних характеристик. Тому в методології створення ОЕСС експериментальні методи доцільно розробляти в першу чергу для визначення енергетичних характеристик. Проблемою експериментального визначення енергетичних характеристик ОЕСС, особливо в умовах України, є відсутність метрологічної бази, повірених засобів вимірювань. Отже метою даного розділу є розробка експериментальних методів визначення енергетичних характеристик ОЕСС, які можуть бути практично реалізованими на вітчизняних підприємствах.

Просторові характеристики спектральних каналів розраховуються за єдиним алгоритмом. Для ТВ і ТПВ каналів ближнього ІЧ діапазону ($\lambda < 2,5\text{мкм}$) енергетичні розрахунки є однаковими, а при $\lambda > 2,5\text{мкм}$ мають виконуватись окремо. В даній роботі досліджується перший варіант. До основних енергетичних характеристик ОЕСС, які є спільними для спектральних каналів, відносять градувальну характеристику, яку також називають функцією передачі сигналу (ФПС), спектральну характеристику, відносну зонну характеристику.

Зазначені характеристики (перші дві у відносних одиницях) вимірюються попередньо на стадії метрологічної атестації каналів ОЕСС. Потім після переносу одиниці спектральної щільності енергетичної яскравості (СЩЕЯ) від еталону до метрологічних випромінюючих елементів атестаційної установки виконується абсолютизація їх шкал відносної яскравості та визначаються основні параметри ОЕСС по виміряним раніше відносним характеристикам: інтегральна, зонна та абсолютна спектральна чутливість, динамічний діапазон.

Отже для метрологічної атестації ОЕСС необхідно забезпечити виконання таких операцій [211]:

- 1) Вимірювання відносної градуовальної характеристики $U_{\text{вих}} = f(L)$, де $U_{\text{вих}}$ – електричний сигнал на виході ОЕСС; L – яскравість ФЦО;
- 2) Вимірювання відносної спектральної характеристики $U_{\text{вих}} = f(\lambda)$;
- 3) Вимірювання відносної зонної характеристики $U_{\text{вих}} = f(D_{\text{вх.}x,y})$, де $D_{\text{вх.}x,y}$ – координати точки у вхідній зіниці ОЕСС;
- 4) Перенос одиниці СЩЕЯ від державного еталона до метрологічних елементів установки;
- 5) Абсолютизація шкал відносної яскравості і спектральної характеристики.

Одночасно вимірюється середньоквадратичне відхилення напруги шуму і визначається величина відношення сигнал/шум.

5.1 Елементна база вимірювального стенду

Для вибору найбільш раціональної схеми побудови вимірювального стенду розглянемо доступну в Україні елементну базу і її метрологічні характеристики. Розглянемо джерела випромінювання, дифузні елементи, фотоелектричний компаратор, спектральний блок [212, 213].

Похибки вимірювання та передачі розміру енергетичних величин в діапазоні довжин хвиль (0,2 - 2,5) мкм наявних на сьогоднішній день засобів вимірювання та повірочних схем [214, 215] приведені в табл. 5.1.

Відносні похибки відтворення енергетичних величин

Засоби вимірювання	Одиниця вимірювання	
	Спектральна щільність енергетичної яскравості сили випромінювання	Потужність випромінювання та енергетична освітленість
Державний еталон (модель АЧТ)	$\sigma=0,5 \cdot 10^{-2}$	$\sigma=0,3 \cdot 10^{-2}$
Робочі еталони (моделі АЧТ, стрічкові, галогенні та дейтерієві лампи)	$\Delta_{\beta}=2 \cdot 10^{-2} - 8 \cdot 10^{-2}$	$\Delta_{\beta}=2 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}$
Робочі засоби вимірювань (дейтерієві, стрічкові, пустотілі та галогенні лампи)	$\Delta_{\beta}=2 \cdot 10^{-2} - 12 \cdot 10^{-2}$	$\Delta_{\beta}=2 \cdot 10^{-2} - 10^{-2}$

σ - середньоквадратичне відхилення результату вимірювання, Δ_{β} - границі допустимих відносних похибок вимірювання

Безсумнівно, що при поетапному переносі величини, що вимірюється, і використанні для вимірювань тільки робочих засобів отримати похибку калібрування менше ніж (8-10)% неможливо. Аналогічні результати отримані також на інших установках. Наприклад, похибка передпольотної абсолютної калібровки системи ТМ супутника Landsat [216] і систем типу SPOT/HRV [217] складала $\pm 10\%$ і, як показано в [218], не може бути менше ніж $\pm 6,8\%$.

Рішенням проблеми може бути використання в повірочних схемах робочих (вторинних) еталонів, що періодично перевіряються по державному еталону і стабільних фотоелектричних компараторів з похибкою вимірювання енергетичних характеристик менше, ніж 1%. Як такі робочі еталони можна використовувати світловимірювальні лампи типу СИС (наприклад СИС 107-1500 [219]), а для вторинних засобів вимірювання найбільш доречно використовувати лампи розжарювання з вольфрамовою ниткою і галогенним наповненням [220]. Як показано в [221], нестабільність потоку таких ламп може бути доведена до 0,1%, але при достатньо складних джерелах живлення. В [222, 223] показано, що для забезпечення вимог, що висуваються до джерела випромінювання (ДВ), доцільно використовувати малогабаритні галогенні лампи потужністю (200 - 400) Вт з розміром тіла розжарення (2 - 5) мм і діаметром колби не більше (10 - 15) мм (для

забезпечення необхідної відстані до розсіювача).

До поля яскравості, що формується освітлювачами, висуваються жорсткі вимоги по величині енергетичної яскравості (більше $250 \text{ Вт/ср}\cdot\text{м}^2$) з можливістю плавної зміни в межах $(100 - 250) \text{ Вт/ср}\cdot\text{м}^2$, спектральної однорідності (абсолютна похибка не більше ніж 3%), стабільності (похибка відтворення не більше 2%).

На сьогоднішній день використовують два метода формування поля яскравості - за допомогою розсіючого екрана [220] та інтегруючої сфери [224]. Перевагами розсіючого екрана є відносно невеликі габарити (описана в [220] панель мала розмір $0,5 \text{ м}^2$) і простота. Однак для роботи з таким розсіювачем необхідна попередня калібровка фотометром з точно відомим тілесним кутом, а для забезпечення необхідної енергетичної яскравості потрібно застосовувати потужні дугові лампи.

Інтегруюча сфера забезпечує кращі метрологічні характеристики установки, хоч і має більші габарити. Наприклад, описана в [224] сфера, для забезпечення однорідної опроміненості вхідної зіниці ОЕСС діаметром $0,41 \text{ м}$ мала діаметр $1,22 \text{ м}$. Практика вимірювань свідчить, що відношення діаметра сфери до її вихідного отвору в межах $(4 - 6)$ можна вважати достатнім для сформульованої задачі. Важливою перевагою інтегруючої сфери є можливість використання декількох відносно малопотужних випромінювачів, причому їх взаємне положення не є критичним.

Зміна рівня енергетичної яскравості може виконуватись як калібрувальним нейтральним світлофільтром (наприклад, зразковим набором НС-102 [225]), так і переміщенням джерела випромінювання відносно світлорозсіючої панелі. Перший спосіб дозволяє добитися похибки калібрування менше ніж $0,1\%$, але в обмеженій області спектра. Другий спосіб не змінює спектрального складу випромінювання, але габарити системи значно зростають. Дифузно відбиваючі покриття виготовляють з оксиду магнію, сульфата барію та деяких видів нітроемалей. При коефіцієнті відбиття до $0,93$ вони забезпечують дифузність близьку до одиниці на довжинах хвиль до $3,5 \text{ мкм}$ [225], але мають низькі експлуатаційні характеристики.

Для розсіювачів невеликих розмірів доцільно використовувати молочне скло,

що має дуже високі метрологічні характеристики. Наприклад, для скла МС-2В коефіцієнт розсіювання становить (90 - 92)% при дифузній ламбертовій індикатрисі розсіювання [226].

Відносний метод вимірювання передбачає наявність в каналі порівняння високостабільного фотоелектричного компаратора з великим діапазоном лінійності, високою амплітудною роздільною здатністю і незначним зонним ефектом. Таким компаратором може бути фотодіод з оптичним інтегруючим елементом, підключений до операційного підсилювача [214]. Основні характеристики вимірювальних кремнієвих фотодіодів розглянуто в [227, 228]. Германієві фотодіоди досліджувались значно менше (так, до вимірювальних германієвих діодів можна віднести, напевно, лише ФД-5Г і ФД-7Г).

До переваг кремнієвих фотодіодів, що працюють в області (0,2 - 1,2) мкм, слід віднести великий динамічний діапазон і високу стабільність. Наприклад, границя лінійності ФД-24К складає в імпульсному режимі 0,25 А, а в неперервному - 0,02 А при темновому струмі менше ніж 1 мкА. Втома фотодіода майже відсутня як при великих частотах повторення імпульсів випромінювання, так і в неперервному режимі. Для вимірювання сигналу можна використовувати вольтметр В7-34А, який в межах (1 - 10) В має випадкову похибку менше 10^{-5} [225].

Значною проблемою є нерівномірність чутливості ПВ по поверхні. Серед відомих методів зменшення цієї похибки [229, 230] найбільш ефективним засобом вважається використання інтегруючої сфери з молочним склом. Вимірюване випромінювання вводиться через один з отворів в сфері, а в інший - перпендикулярно до оптичної осі - встановлюється фотодіод. Недоліком пристрою є значне (до 200 раз) ослаблення випромінювання. Проте для систем, що створюють значну яскравість, це не є критичним.

Вимірювання спектральних характеристик ОЕСС може проводитись по стандартній методиці [231, 232]. Основною проблемою є забезпечення точної монохроматизації потоку випромінювання і неселективності фотометра порівняння. Для діапазону (0,3 - 2,5) мкм можна використовувати подвійний монохроматор ДМР-4 з стрічковою лампою в якості випромінювача, а як приймач

випромінювання - термоелемент РТН-20С, який забезпечує неселективність не більше 2%, що, взагалі, і визначає похибку вимірювань спектральної характеристики.

5.2 Вимірювання функції передачі сигналу

Дослідження енергетичних характеристик ОЕСС вимагає застосування фотометричного приладу, який тим чи іншим способом створює нормований ряд освітленості або яскравості, чи дозволяє плавно змінювати ці величини на вході ПВ або на входній зіниці ОЕСС [231].

Для створення каліброваного ослаблювача або інтегрального освітлювача з калібною яскравістю, що міг би бути основою фотометричного вузла первинного приладу, необхідно обґрунтувати принцип побудови ослаблювача, а також обґрунтовано підібрати конструктивні елементи (первинні ДВ, розсіювальні пластинки, покриття тощо) для найкращої реалізації відповідного вимірювального стенду. Принцип вимірювання ФПС ОЕСС зображено на рис. 5.1.

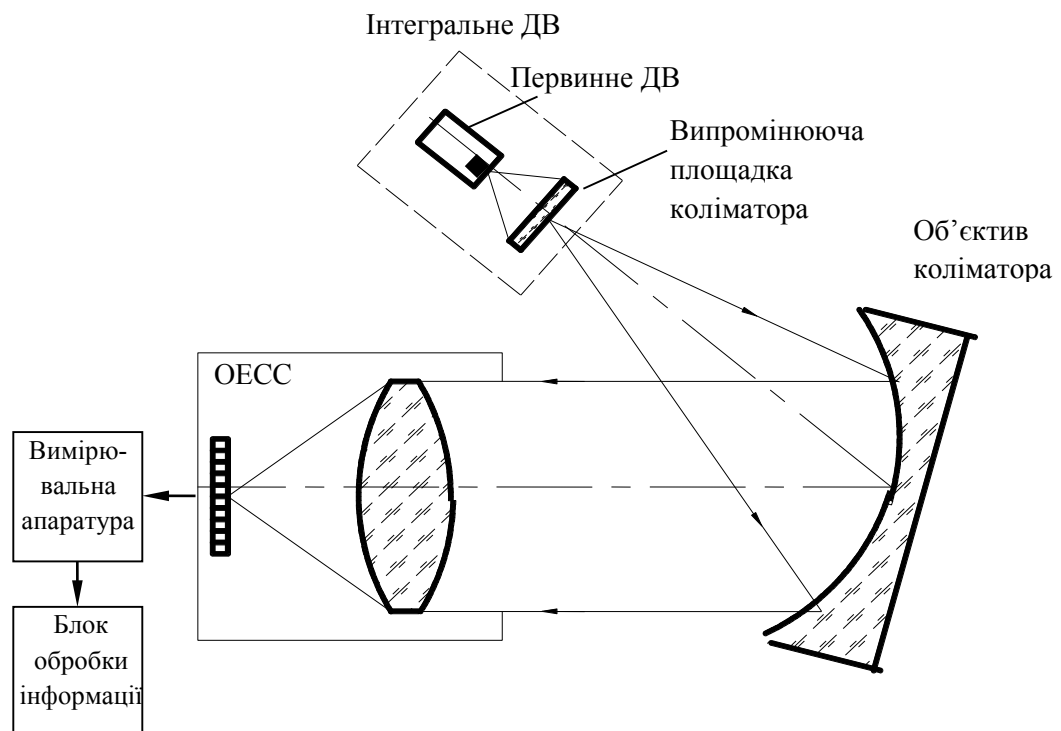


Рис. 5.1. Функціональна схема вимірювання ФПС ОЕСС

Основними вимогами до ослаблювача світла є:

- 1) спектральна нейтральність у всьому діапазоні ослаблення світла (у видимому та ІЧ діапазонах спектра);
- 2) незмінність апертури пучка світла, що ослаблюється;
- 3) відсутність дифракційних втрат або їх мінімізація;
- 4) рівномірність ослаблення пучка випромінювання по його перетину;
- 5) максимальна яскравість вторинного ДВ (випромінюючої площадки коліматора) у видимому діапазоні спектру $1500 \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2$, що впливає з експериментальних даних про вимірюванні освітленості поверхні Землі;
- 6) динамічний діапазон яскравості вторинного ДВ $\frac{L_{\max}}{L_{\min}} = 10^5$;
- 7) по можливості більше поле з рівномірною яскравістю (для освітлення одночасно всього МПВ);
- 8) нерівномірність яскравості вторинного випромінювача не більше 2 %;
- 9) мінімальна похибка встановлення потрібного значення яскравості.

Вимірювання ФПС передбачає наявність фотометричного приладу, який створює нормований ряд освітленості або яскравості, чи дозволяє плавно змінювати ці величини на поверхні ПВ. Таким приладом є калібрований ослаблювач світла або каліброване інтегральне ДВ, яке зручно оцінювати інтегральним коефіцієнтом пропускання.

В якості ДВ може бути використана галогенна лампа КГМ-30-300-2. Для подовження періоду працездатності ламп їх використовують при зниженій напрузі, яка відповідає температурі тіла розжарення $T=2850 \text{ К}$. У паспортних даних на указану лампу наведений інтегральний потік $\Phi=9000 \text{ лм}$, який випромінюється лампою при температурі вольфрамового тіла розжарення $T=3200 \text{ К}$, а працює вона при іншій температурі. Тому було виконано перерахунок фотометричних характеристик лампи для температури $T=2850 \text{ К}$ у межах від $\Delta\lambda = (0,4 - 8,5) \text{ мкм}$. Величина повного енергетичного потоку, який випромінює галогенна лампа при температурі $T=2850 \text{ К}$ становить 130 Вт .

Регулювання яскравості доцільно здійснювати із застосуванням закону

зворотних квадратів відстаней. Схему ослаблювача з безпосереднім освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней наведено на рис. 5.2.

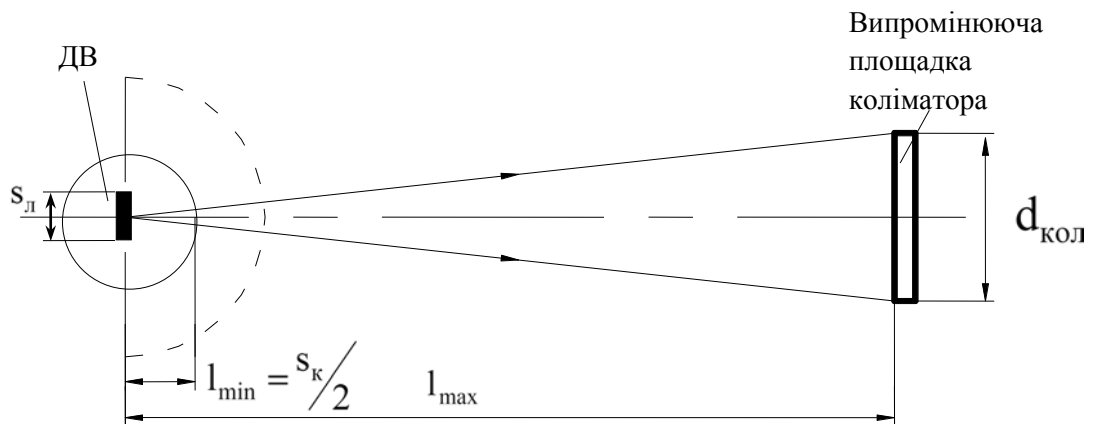


Рис. 5.2. Схема інтегрального випромінювача з безпосереднім опроміненням площадки коліматора за законом зворотних квадратів

Така схема має декілька особливостей:

1) Галогенна лампа випромінює потік у тілесному куті 4π ср, але корисною є тільки частина потоку, що розповсюджується у куті 2π ср у напрямку розташування випромінюючої площадки коліматора. Тобто у розрахунках необхідно використовувати величину, що становить не більше половини від розрахованого вище енергетичного потоку;

2) У ближній зоні спостерігається відхилення залежності яскравості від закону зворотних квадратів;

3) Найменша відстань, на якій може розташовуватися випромінююча площадка коліматора від ДВ, становить половину діаметра колби лампи.

Яскравість тіла розжарення лампи КГМ-30-300-2 становить

$$L_{\lambda} = \frac{\Phi_B}{2\pi \cdot s_{\lambda} \cdot h_{\lambda}} = \frac{130}{2 \cdot 3,14 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-3}} = 9,852 \cdot 10^5, \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2.$$

Для спрощення розрахункових формул замінимо прямокутну форму тіла розжарення лампи на круглу. При цьому випромінююча площа тіла розжарення повинна бути постійною: $A_{\lambda} = s_{\lambda} \cdot h_{\lambda} = 2,1 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2$.

Радіус круглого еквівалентного тіла розжарення лампи дорівнює при цьому

$$r_l = \sqrt{\frac{A_l}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{-5}}{3,14}} = 2,585 \cdot 10^{-3}, \text{ м.}$$

Розглянемо два випадки:

а) випромінююча площадка коліматора перебуває на великій відстані, де лампу розжарення можна вважати точковим джерелом, і освітленість, створювана точковим джерелом у центрі оберненої до лампи сторони випромінюючої площадки коліматора, формується за законом зворотних квадратів

$$E_{\text{кол}}(l) = \frac{I_l}{l^2}, \quad (5.1)$$

де I_l – сила випромінювання точкового джерела у напрямку до центру випромінюючої площадки коліматора. Оскільки в першому наближенні припускаємо, що галогенна лампа випромінює рівномірно у всіх напрямках, то такий випромінювач можна вважати ламбертівським джерелом, а отже можна записати, що

$$I_l = A_l \cdot L_l,$$

де A_l – площа еквівалентного круглого тіла розжарення лампи.

Яскравість випромінюючої площадки коліматора буде залежати від відстані між нею та первинним ДВ наступним чином

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{E_{\text{кол}}}{\pi} = \frac{A_l \cdot L_l \cdot \tau}{\pi \cdot l^2} = \frac{\pi \cdot r_l^2 \cdot L_l \cdot \tau}{\pi \cdot l^2} = \frac{r_l^2 \cdot L_l \cdot \tau}{l^2}, \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2. \quad (5.2)$$

б) для випадку невеликих відстаней залежність яскравості центральної точки випромінюючої площадки коліматора, що має також круглу форму, від відстані до тіла розжарення лампи (враховуючи коефіцієнт пропускання розсіювального екрану, який розміщено у площині випромінюючої площадки коліматора) має вигляд

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_l \cdot r_l^2 \cdot \tau}{l^2 + r_l^2}, \quad \text{Вт/ср} \cdot \text{м}^2, \quad (5.3)$$

де $l \geq \frac{s_k}{2} \Rightarrow l_{\min} = 7,5 \cdot 10^{-3}, \text{ м.}$

Максимальна яскравість випромінюючої площадки коліматора (вторинного

випромінювача) буде спостерігатися при мінімальній відстані до тіла розжарення лампи:

$$L_{\text{кол}}^{\text{max}} = L_{\text{кол}}(l_{\text{min}}) = \frac{9,852 \cdot 10^5 \cdot (2,585 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5}{(7,5 \cdot 10^{-3})^2 + (2,585 \cdot 10^{-3})^2} = 5,232 \cdot 10^4, \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2.$$

Яскравість випромінюючої площадки коліматора досягає свого мінімального значення $L_{\text{кол}}^{\text{min}} = \frac{L_{\text{кол}}^{\text{max}}}{10^5} = \frac{5,232 \cdot 10^4}{10^5} = 0,523, \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2$ при

$$l_{\text{max}} = l(L_{\text{кол}}^{\text{min}}) = \sqrt{\frac{L_{\text{л}} \cdot A_{\text{л}} \cdot \tau}{\pi \cdot L_{\text{кол}}^{\text{min}}}} = \sqrt{\frac{9,852 \cdot 10^5 \cdot 2,1 \cdot 10^{-5} \cdot 0,5}{3,14 \cdot 0,523}} = 2,509, \text{ м}.$$

Дана схема забезпечує досить високий рівень яскравості вторинного випромінювача, але досягнення бажаного динамічного діапазону яскравості вимагає великих відстаней від тіла розжарення лампи до випромінюючої площадки коліматора. Тобто така схема має великі габарити. Для зменшення габаритів установки можливе використання додаткових елементів ослаблення: неселективних нейтральних світлофільтрів з відомим коефіцієнтом пропускання, сітчастих ослаблювачів тощо.

Оцінку лінійної зони, у якій нелінійність розподілу яскравості по перетину вихідної зіниці ослаблювача не перевищує (1–2)%, можна виконати по даним роботи [211], де наведено необхідні графіки. Можна відмітити, що найбільша нерівномірність розподілу яскравості по перетину випромінюючої площадки коліматора буде спостерігатися при мінімальній відстані від неї до тіла розжарення лампи $l_{\text{min}} = 7,5 \cdot 10^{-3}, \text{ м}$. З відповідного графіку знаходимо розмір лінійної зони, де яскравість змінюється на 2%. Вона становить $\Delta r_{\text{lin}}(l_{\text{min}}) = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. На великій відстані випромінюючої площадки коліматора від тіла розжарення лампи розподіл яскравості по перетину вторинного випромінювача є досить рівномірним, тому лінійною зоною можна вважати всю пластинку.

Схему ослаблювача з освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней та конденсором наведено на рис. 5.3. Як і у попередньому випадку будемо вважати, що тіло розжарення лампи має форму

круга, радіус якого $r_{\text{л}} = 2,585 \cdot 10^{-3}$ м. Якщо збільшення конденсора $\beta = -2^x$, то радіус вторинного випромінювача дорівнюватиме $r_{\text{вт}} = 5,171 \cdot 10^{-3}$ м, а площа $A_{\text{вт}} = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

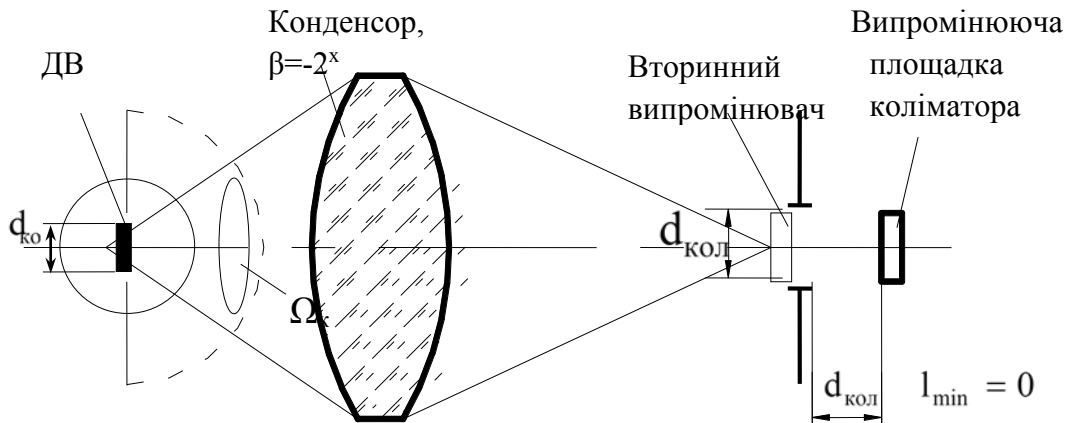


Рис. 5.3. Схема ослаблювача з освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней та з конденсором

Для визначення світлосили такої системи необхідно обчислити її втрати. Тілесний кут, у якому поширюється потік випромінювання, що попадає в конденсор, дорівнює

$$\Omega_{\kappa} = 2\pi \cdot \left(1 - \cos \left(\arctg \frac{D_{\kappa}}{2 \cdot f'_{\kappa}} \right) \right) = 2\pi \cdot \left(1 - \cos \left(\arctg \frac{1}{2 \cdot 1} \right) \right) = 0,6633, \text{ср}.$$

Втрати в конденсорі через неузгодженість кута випромінювання галогенної лампи й тілесного кута конденсора $\tau_{\kappa} = \frac{\Omega_{\kappa}}{4\pi} = \frac{0,6633}{4 \cdot 3,14} = 0,053$.

Потік, який поступає у площину вторинного випромінювача через конденсор,

$$\Phi_{\kappa} = \Phi_B \cdot \tau_{\kappa} = 130 \cdot 0,053 = 6,862, \text{Вт}.$$

Яскравість вторинного випромінювача:

$$L_{\text{вт}} = \frac{\Phi_{\kappa}}{\pi \cdot A_{\text{вт}}} = \frac{6,862}{3,14 \cdot 8,4 \cdot 10^{-5}} = 2,6 \cdot 10^4, \text{Вт/ср} \cdot \text{м}^2.$$

Розглянемо два випадки:

а) випромінююча площадка коліматора перебуває на відстані, меншій 10 розмірів вторинного випромінювача, тоді яскравість у центрі випромінюючої площадки коліматора обчислюється по формулі (5.3).

Результати розрахунку по наведених формулі представлені на графіку рис. 5.4, а).

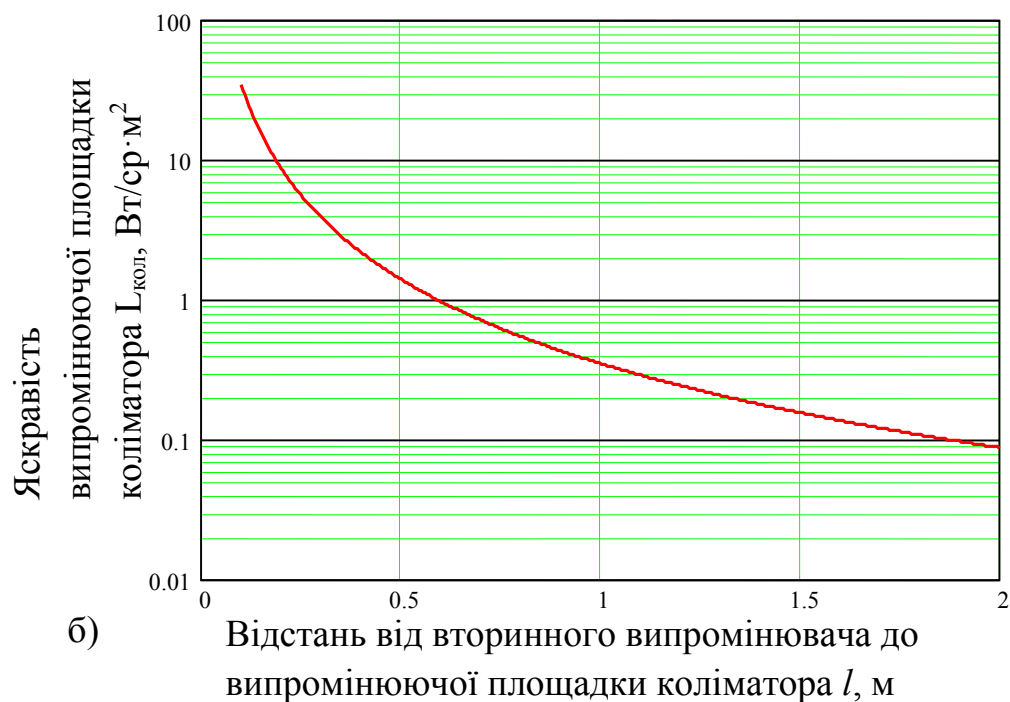
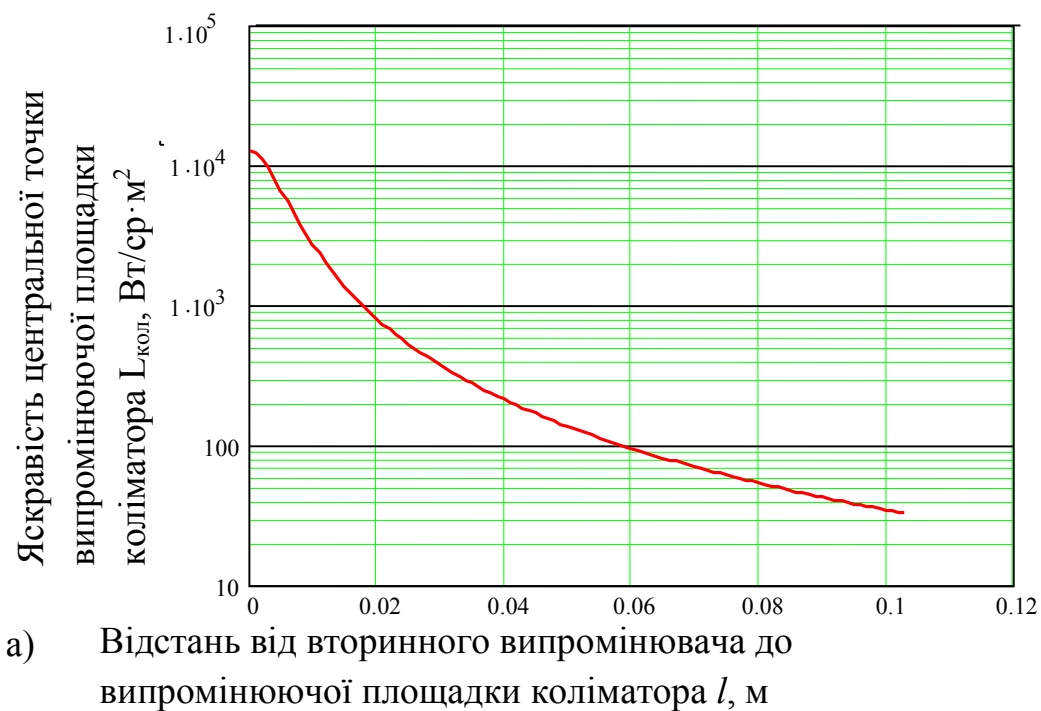


Рис. 5.4. Яскравість центральної точки випромінюючої площадки коліматора у схемі з конденсором: а) для неточкового джерела, б) для віддаленого (точкового) джерела

Максимальна яскравість випромінюючої площадки коліматора дорівнює:

$$L_{\text{кол}}^{\text{max}} = L_{\text{кол}}(l_{\text{min}} = 0) = \frac{2,6 \cdot 10^4 \cdot (5,171 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5}{0 + (5,171 \cdot 10^{-3})^2} = 1,3 \cdot 10^4, \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2.$$

б) випромінююча площадка коліматора розміщена на великій відстані і вторинне ДВ можна вважати точковим, тоді:

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_{\text{вт}} \cdot \tau \cdot r_{\text{вт}}^2}{l^2}, \text{ де } l > 20 \cdot r_{\text{вт}}.$$

Яскравість випромінюючої площадки коліматора досягає мінімального значення $L_{\text{кол}}^{\text{min}} = \frac{L_{\text{кол}}^{\text{max}}}{10^5} = \frac{1,3 \cdot 10^4}{10^5} = 0,13, \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2$ при

$$l_{\text{max}} = l(L_{\text{кол}}^{\text{min}}) = \sqrt{\frac{L_{\text{вт}} \cdot r_{\text{вт}}^2 \cdot \tau}{L_{\text{кол}}^{\text{min}}}} = \sqrt{\frac{2,6 \cdot 10^4 \cdot (5,171 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5}{0,13}} = 1,635, \text{ м}.$$

Дана схема дає дещо меншу яскравість випромінюючої площадки коліматора, ніж попередня, але має менші габарити. Важливим також є вибір матеріалу для конденсора, оскільки він повинен бути неселективним у робочому спектральному діапазоні.

Логічно припустити, що, оскільки збільшення конденсора дорівнює $\beta = -2^x$, то лінійна зона розподілу яскравості по перетину вторинного випромінювача буде вдвічі більше від попереднього випадку для критичного випадку, коли відстань є мінімальною ($l_{\text{min}} = 0$): $\Delta r_{\text{лін}}(l_{\text{min}}) = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Результати розрахунку представлено на графіку рис. 5.4, б).

При введенні ослаблюючої сітки в схему між первинним ДВ та розсіювальною пластинкою коліматора досягається додаткове зменшення яскравості вторинного випромінювача. Це дозволяє отримати потрібне зменшення яскравості на меншій відстані, ніж у схемі з безпосереднім опроміненням випромінюючої пластинки коліматора.

Будемо вважати, що сітка завжди розташована так, що весь потік, який потрапляє на випромінюючу площадку коліматора, проходить через неї. Як і раніше вважаємо, що випромінююча та опромінювана поверхні є круглими.

Аналогічно до попередніх схем розглядаємо два випадки при введенні сітки в хід променів:

а) розсіювальний екран, який є випромінюючою площадкою коліматора розташований близько до первинного джерела. Найменша відстань, на якій може розташовуватися розсіювальний екран коліматора відносно тіла розжарення лампи, дорівнює

$$l'_{\min} = \frac{s_l}{2} + d_c = 7,5 \cdot 10^{-3} + 10^{-3} = 8,5 \cdot 10^{-3}, \text{ м.}$$

Для розрахунку яскравості випромінюючої площадки коліматора використовуємо формулу

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_l \cdot \tau_c \cdot \tau \cdot r_l^2}{l^2 + r_l^2}, \quad (5.4)$$

де $l'_{\min} < l < 20 \cdot r_l$; τ_c - коефіцієнт пропускання сітки.

Результати розрахунку наведені на рис. 5.5, а.

Максимальне значення яскравості випромінюючої площадки коліматора при введенні сітки

$$L_{\text{кол}}^{\max} = L_{\text{кол}}(l'_{\min} = 8,5 \cdot 10^{-3}) = \frac{9,852 \cdot 10^5 \cdot (2,585 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{(8,5 \cdot 10^{-3})^2 + (2,585 \cdot 10^{-3})^2} = 2,086 \cdot 10^4, \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2.$$

б) випромінююча площадка коліматора знаходиться на великій відстані і галогенну лампу можна вважати точковим джерелом випромінювання, тоді:

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_l \cdot \tau_c \cdot \tau \cdot r_l^2}{l^2}, \text{ де } l > 20 \cdot r_l \text{ (рис. 5.5, б).}$$

Яскравість випромінюючої площадки коліматора досягає мінімального значення $L_{\text{кол}}^{\min} = \frac{L_{\text{кол}}^{\max}}{10^5} = \frac{5,232 \cdot 10^4}{10^5} = 0,523 \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2$ при використанні сітки на відстані

$$l_{\max} = l(L_{\text{кол}}^{\min}) = \sqrt{\frac{L_l \cdot r_l^2 \cdot \tau \cdot \tau_c}{L_{\text{кол}}^{\min}}} = \sqrt{\frac{9,852 \cdot 10^5 \cdot (2,585 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,523}} = 1,774, \text{ м.}$$

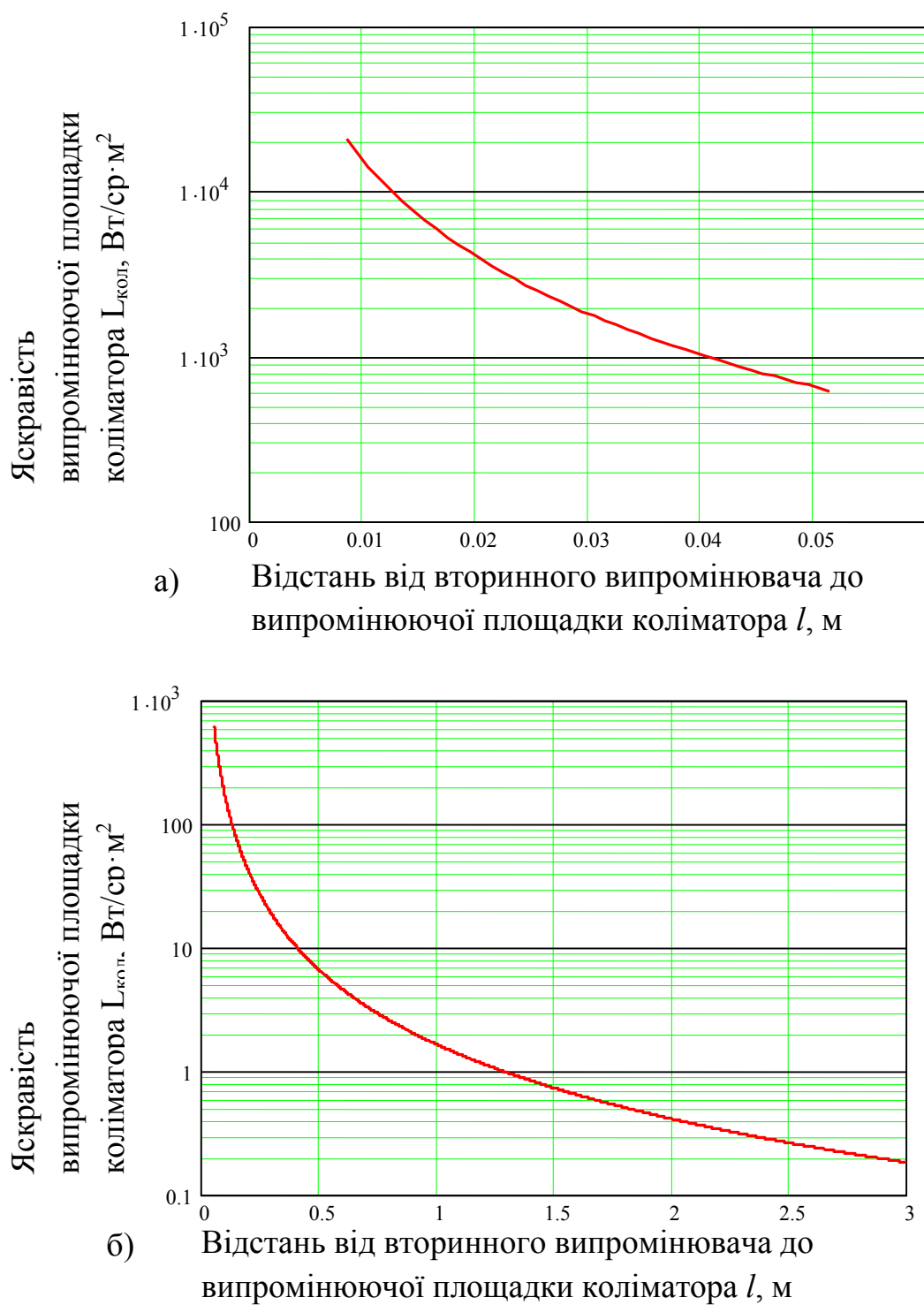


Рис. 5.5. Яскравість центральної точки випромінюючої площадки коліматора у схемі з сіткою: а) неточкове джерело; б) точкове джерело

Лінійна зона випромінюючої площадки дорівнює $\Delta r_{\text{ли}}(l_{\text{min}}) = 1,8 \cdot 10^{-3}$ м. На великій відстані випромінюючої площадки коліматора від тіла розжарення лампи розподіл яскравості по перетину вторинного випромінювача є досить рівномірним

(внаслідок додаткового розсіювання сіткою), тому лінійною зоною можна вважати всю пластинку.

Схема з сітчатим ослаблювачем з коефіцієнтом пропускання $\tau_c = 0,5$ вдвічі зменшує яскравість випромінюючої площадки коліматора. Габарити вимірювальної установки є досить великими, але меншими від схеми з безпосереднім освітленням випромінюючої площадки коліматора за законом зворотних квадратів відстаней.

Поляризаційний ослаблювач на законі Малюса має різко виражену спектральну селективність і є непридатним для використання в даному випадку.

Ослаблювач, в якому в якості ДВ використовується інтегруюча сфера має великий розмір вихідної зіниці і дозволяє створити на випромінюючій площадці коліматора більш рівномірний розподіл освітленості, ніж у схемі з безпосереднім освітленням за законом зворотних квадратів. За рахунок інтегрування всередині кулі у вихідній зіниці формується досить рівномірний розподіл яскравості, але можливий спектральний перерозподіл при використанні селективного покриття для внутрішньої поверхні.

Для оцінки впливу отвору, що вирізує на поверхні сфери колба джерела випромінювання, і вихідної зіниці сфери на сумарну освітленість у вихідній зіниці розрахуємо ефективну площу кулі, що розсіює випромінювання:

- площа кульового сегмента, що опирається на площадку колби, дорівнює [233]

$$A_k = 2\pi \cdot R_{\text{сф}} \cdot R_{\text{сф}} - R_{\text{сф}} \cos \left(\arcsin \left(\frac{S_k}{2 \cdot R_{\text{сф}}} \right) \right) = 1,77 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2 \quad (5.5)$$

- площа кульового сегмента, що опирається на вихідну зіницю, дорівнює

$$A_z = 2\pi \cdot R_{\text{сф}} \cdot \left[R_{\text{сф}} - R_{\text{сф}} \cdot \cos \left(\arcsin \left(\frac{R_z}{R_{\text{сф}}} \right) \right) \right] = 1,995 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2. \quad (5.6)$$

Відносна ефективна випромінююча площа кулі дорівнює

$$A_{\text{eff}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot R_{\text{сф}}^2 - A_k - A_z}{4 \cdot \pi \cdot R_{\text{сф}}^2} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2 - 1,77 \cdot 10^{-4} - 1,995 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2} = 0,983.$$

Сумарна освітленість вихідної зіниці інтегруючої сфери (вторинного випромінювача) дорівнює [234]

$$E_{\Sigma} = \frac{\rho \cdot \Phi_B}{4\pi \cdot R_{\text{сф}}^2} \cdot \frac{1}{1 - \rho \cdot A_{\text{eff}}} = \frac{0,95 \cdot 130}{4\pi \cdot 0,1^2} \cdot \frac{1}{1 - 0,95 \cdot 0,983} = 1,48 \cdot 10^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \quad (5.7)$$

Яскравість вторинного випромінювача

$$L_{\text{ем}} = \frac{E_{\Sigma}}{\pi} = \frac{1,48 \cdot 10^4}{3,14} = 4,71 \cdot 10^3, \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2.$$

Площа вторинної випромінюючої площадки (вихідної зіниці)

$$A_{\text{ем}} = \pi \cdot R_3^2 = 1,963 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2.$$

Яскравість центральної точки випромінюючої площадки коліматора, що перебуває на відстані, меншій 10 розмірів вихідної зіниці круглої форми, обчислюється за формулою, аналогічною до формули (5.4)

$$L_{\text{кол}}(l) = \frac{L_{\text{вт}} \cdot \tau \cdot R_3^2}{l^2 + R_3^2}, \text{ де } l = (0 - 0,5) \text{ м.}$$

Максимальна яскравість випромінюючої площадки коліматора спостерігається у випадку, коли розсіювальна пластинка (випромінююча площадка коліматора) розташована безпосередньо у вихідній зіниці сфери і дорівнює

$$L_{\text{кол}}^{\text{max}} = L_{\text{кол}}(l=0) = \frac{4,71 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 0,025^2}{0 + 0,025^2} = 2,355 \cdot 10^3, \text{ Вт/ср} \cdot \text{м}^2.$$

Яскравість випромінюючої площадки коліматора досягає мінімального значення: $L_{\text{кол}}^{\text{min}} = \frac{L_{\text{кол}}^{\text{max}}}{10^5} = \frac{2,355 \cdot 10^3}{10^5} = 0,0236, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}$ при відстані між випромінюючою площадкою коліматора й вихідною зіницею сфери, що становить

$$l_{\text{max}} = l(L_{\text{кол}}^{\text{min}}) = \sqrt{\frac{L_{\text{вт}} \cdot R_3^2 \cdot \tau}{L_{\text{кол}}^{\text{min}}}} = \sqrt{\frac{4,71 \cdot 10^3 \cdot (0,025)^2 \cdot 0,5}{0,0236}} = 7,906, \text{ м.}$$

Лінійною зоною можна вважати всю вихідну зіницю сфери $\Delta r_{\text{лін}}(l_{\text{min}}=0) = 2 \cdot R_3 = 0,05 \text{ м}$, оскільки доведено теоретичними та практичними дослідженнями, що відхилення яскравості у вихідній зіниці інтегруючої кулі знаходяться в межах 2%.

Отже схема з фотометричною кулею забезпечує значну яскравість, але має великі габарити.

Вцілому можна сказати, що випромінювач змінної яскравості, побудований за схемою зворотних квадратів, зважаючи на незначну апертуру поля яскравості, забезпечує вимірювання ФПС тільки для декількох центральних пікселів. При цьому ФПС вимірюється в усьому динамічному діапазоні (який для сучасних установок становить $(10^3 - 5 \cdot 10^3)$). Однак подальше збільшення динамічного діапазону пов'язане зі значним зростанням габаритів випромінювача змінної яскравості і, звичайно, не реалізується [222]. Для отримання ФПС на пікселях поза центральної зони зазвичай здійснюється додаткове обчислення з використанням зонної характеристики МПВ

5.3 Вимірювання спектральної характеристики

Вимірювання відносної спектральної характеристики ОЕСС може проводитися по стандартній методиці [235] з використанням неселективної фотометрії порівняння. Основними проблемами є забезпечення достатньо високої монохроматичності зондуючого випромінювання і малої похибки (менше 3 %) при значному рівні сигналу на ПВ ОЕСС.

Для діапазону довжин хвиль (0,4 - 1,8) мкм в спектральному випромінювачі можуть використовуватися подвійні монохроматори МДР-41, МДР-204 і МДР-206. МДР-204 забезпечує зворотну лінійну дисперсію 2,6 нм/мм, а МДР-206 – 4,3 нм/мм при відносному отворі об'єктиву 1/6 і 1/4 відповідно. Похибка установки довжини хвилі становить менше 0,5 нм.

З монохроматорами добре узгоджуються стрічкові лампи типу СІРШ 6-100 і СІРШ 8,5-200 з колірною температурою 2840 К і 3000 К відповідно. Як неселективні ПВ можна використовувати термоелектричні приймачі РТН-12 і РТН-20 з сапфіровими вікнами, які працюють в діапазоні (0,18 - 5,5) мкм з похибкою перетворення не більше 6 %.

5.4 Вимірювання зонної характеристики

Основною проблемою вимірювання зонної характеристики є створення дифузного випромінювача (ДфВ) з нерівномірністю поля яскравості менше (3 - 5)%, розмірами в (1,2 - 1,3) рази більшими розміру поля зору ОЕСС і високою енергетичною яскравістю (орієнтовно (20 - 100) Вт/ср·м²).

У відомих вимірювальних схемах ця задача розв'язується двома способами: за допомогою розсіюючого екрану або інтегруючої сфери (фотометричної кулі) з отвором, що перевищує розмір вхідної зіниці ОЕСС. Перевагами розсіюючого екрану є відносно невеликі габарити і простота. Інтегруюча сфера забезпечує кращі метрологічні характеристики – перш за все більш рівномірний розподіл променистості у вихідній зіниці.

В більшості установок для вимірювання зонної характеристики в схему вводиться ДфВ, побудований на базі інтегруючої сфери. Випромінювач забезпечує рівномірну освітленість всіх пікселів МПВ, але його яскравість, навіть в найкращих установках, не перевищує (20-30)% від максимально вимірюваної [222, 211].

Тому значення зонної характеристики для верхніх рівнів вимірюваної яскравості визначають екстраполяцією. Тобто, вимірювання ФПС і зонної характеристики проводиться практично або для невеликого числа пікселів, або для малої початкової ділянки динамічного діапазону.

Для абсолютизації вимірювань енергетичних характеристик зазвичай використовується метод перенесення одиниці яскравості (або СЩЕЯ) від еталонного випромінювача до дифузного через об'єktiv (зазвичай - дзеркальний) і компаратор, а від ДфВ до випромінювача змінної яскравості - через саму ОЕСС. Таким чином, ДфВ використовується як вторинний еталон установки, а калібрування випромінювача змінної яскравості виконується в два етапи, причому роль компаратора в цьому випадку виконує МПВ ОЕСС. Використання цього методу в відомих установках є вимушеним заходом, викликаним, насамперед, відсутністю випромінювачів, що дозволяють створювати змінне поле яскравості одночасно у великому динамічному діапазоні і для великих апертур при

незмінному спектральному складі випромінювання.

Пропонується нова методика вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС, яка не має перерахованих вище недоліків і перевершує по метрологічних характеристикам відомі системи [236]. Схема установки, що реалізує цю методику, показана на рис. 5.6. Її основу становить оригінальний дифузний випромінювач змінної яскравості (ДВЗЯ) на базі оптично пов'язаних інтегруючих сфер.

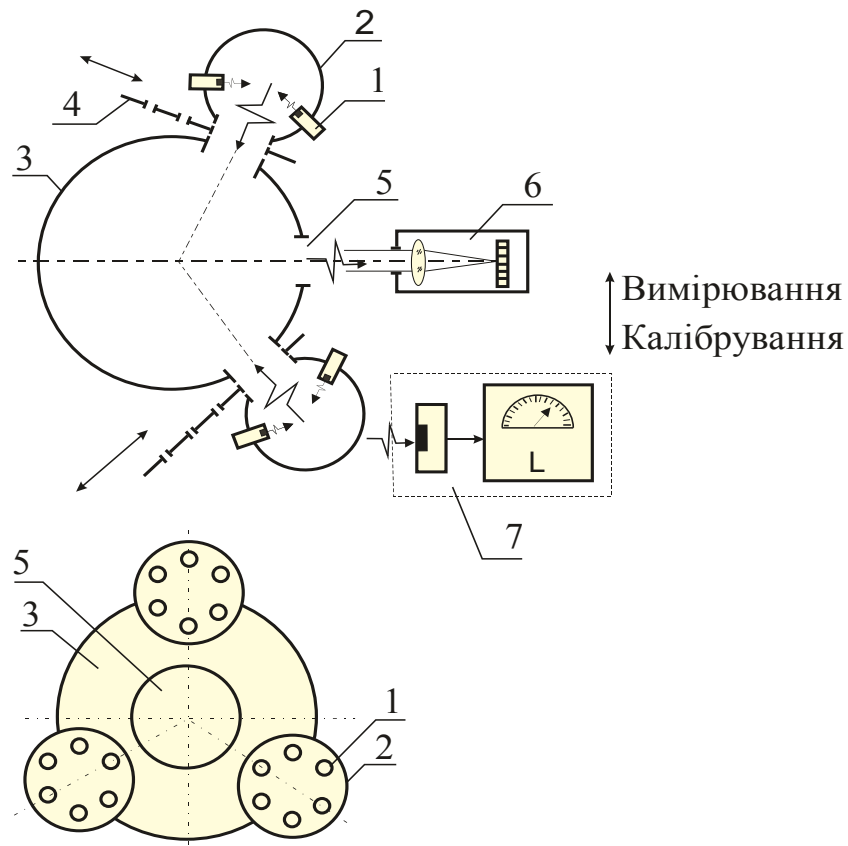


Рис. 5.6. Структурна схема установки для вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС: 1 - ДВ; 2 - первинна сфера; 3 - вторинна сфера; 4 - калібрувальна діафрагма; 5 - вихідна апертура; 6 - ОЕСС; 7 - яскравомір

Як видно з рис. 5.6, джерела випромінювання 1 розташовані в первинних інтегруючих сферах 2, а потік, що надходить з них у вторинну інтегруючу сферу 3, регулюється набором калібрувальних діафрагм 4 різного перетину. У вихідній апертурі 5 вторинної сфери 3 формується однорідне і змінне по величині поле яскравості з фотометричним тілом, що наближається до ламбертівського

випромінювача. Це дозволяє розміщувати ОЕСС 6, безпосередньо у вихідній апертурі ДВЗЯ без застосування додаткової об'єднуючої оптики.

Основними перевагами запропонованого рішення є те, що:

- одночасно опромінюються всі пікселі МПВ в усьому динамічному діапазоні вимірюваної яскравості. Тобто вимірювання ФПС і зонної характеристики проводяться одночасно при незмінній конфігурації установки, що виключає необхідність екстраполяції результатів і істотно підвищує точність вимірювань;

- за рахунок використання великої кількості ДВ в первинних сферах і значного числа калібрувальних діафрагм, виконаних з високою точністю, значно розширюється діапазон відтворюваних яскравостей і підвищується точність їх установки при незмінному спектральному складі випромінювання;

- винесення ДВ з вторинної інтегрувальної сфери, яка безпосередньо формує вихідне поле яскравості, значно покращує рівномірність розподілу яскравості в межах вихідної апертури;

- розміщення ОЕСС безпосередньо у вихідній апертурі випромінювача виключає необхідність використання об'єктивів для сполучення та калімування. Також зменшуються вимоги до точності позиціонування ОЕСС;

- внаслідок того, що для калібрування випромінювача і перенесення одиниці яскравості можуть використовуватись яскравоміри, що встановлюються безпосередньо у вихідній апертурі установки і не потребують точного позиціонування, істотно спрощується і підвищується точність абсолютизації вимірювань.

Як ДВ доцільно використовувати малогабаритні галогенні лампи типу КГМ [237], а для покриттів: або традиційні матеріали на основі BaSO_4 і MgO , або сучасні - на основі політетрафторетилену [238]. В останньому випадку можна отримати високу яскравість ДВЗЯ в спектральному діапазоні від ближнього ультрафіолету до ближньої ІЧ області спектра.

На рис. 5.7 показано лабораторний макет ДВЗЯ з 5 первинними інтегруючими сферами.



Рис. 5.7. Лабораторний макет ДВЗЯ з 5 первинними та вторинною інтегруючою сферами

Проведене макетування та експериментальні дослідження ДВЗЯ [239], підтвердили теоретичні та розрахункові положення і показали, що запропонований випромінювач забезпечує, зокрема, параметри представлені в табл. 5.2. Дослідження проводилися за методикою, викладеною в [238], а для абсолютних вимірювань яскравості використовувався яскравомір ТЕС 0693, який встановлюється безпосередньо у вихідній апертурі випромінювача. Висока лінійність ТЕС 0693 дає можливість проводити атестацію для різних рівнів яскравості, а сталість градування яскравоміра протягом тривалого часу (кілька років) забезпечує високу повторюваність результатів. Експериментально було встановлено, що похибка перенесення яскравості, в цьому випадку, не перевищила 7% у всьому динамічному діапазоні (але в межах паспортного часу безперервної роботи галогенних ламп ДВЗЯ).

Для абсолютизації вимірювань за запропонованою методикою можна використовувати традиційні методики перенесення одиниці яскравості або СЩЕЯ

від еталону до випромінювача через сполучну оптику і компаратор [222].

Таблиця 5.2

Параметри експериментальної моделі ДВЗЯ

Назва параметра	Позначення параметра	Значення параметра
Діаметр первинної інтегруючої сфери, м	d_1	0,2
Кількість первинних сфер, шт	N_1	5
Кількість джерел випромінювання в одній первинній сфері, шт	N_s	7
Тип джерела випромінювання	-	КГМ 30-300
Діаметр вторинної інтегруючої сфери, м	d_2	1,0
Діаметр вихідної апертури, м	$d_{\text{вих}}$	0,2
Спектральний діапазон (по рівню 0,1), мкм	$\lambda_H - \lambda_B$	0,35 - 2,2
Нерівномірність яскравості в вихідній апертурі, не більше, відн. од. $\cdot 10^{-2}$	$\frac{\Delta L_{\text{вих}}}{L_{\text{вих}}}$	0,1
Динамічний діапазон зміни яскравості не менше, відн. од.	$\frac{\Delta L_{\text{вих max}}}{L_{\text{вих min}}}$	10^6
Похибка установки яскравості менше, відн. од. $\cdot 10^{-2}$	$\Delta L_{\text{вих}}$	0,1
Максимальна яскравість вихідної апертури не менше, Вт/ср $\cdot \text{м}^2 \cdot 10^3$	$L_{\text{вих max}}$	0,85

5.5 Вимірювальний стенд

Враховуючи високі вимоги до точності і стабільності (повторюваності) вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС, метрологічне забезпечення вимірювального стенду є ускладненим в умовах України недостатністю фотометричної бази відповідного рангу.

Можливі два принципово різних підходу до метрологічного забезпечення даних вимірювань – з використанням зразкового (еталонного) ДВ або - на основі абсолютного радіометра.

Використання абсолютного радіометра має ряд переваг. В деяких країнах цей метод знаходить застосування навіть в державних еталонах фотометричних величин [240]. Коефіцієнт перетворення такого радіометра визначається за допомогою спеціальної обмотки заміщення, омічний нагрів якої порівнюється термобатаресю з оптичною потужністю, що поглинається в радіометрі.

Спектральна чутливість оптичного каналу коригується спеціальними (звичайно - рідинними) світлофільтрами. Основними недоліками радіометрів є нееквівалентність теплових полів при радіаційному і електричному нагріві, що складно враховується, низька чутливість ($(0,05-1) \text{ В/Вт}$) і висока вартість. Окрім цього, висока точність вимірювання (похибка близько 0,3 %) забезпечується при рівнях опроміненості $(800-1400) \text{ Вт/м}^2$, тоді як в багатьох випадках ця величина є істотно меншою.

Більш розповсюдженим є метод атестації з використанням еталонних випромінювачів, перш за все ламп розжарювання [235, 241]. Для цього можна використовувати різні випромінювачі – галогенові, стрічкові, дейтерієві. Проте, з урахуванням існуючої фотометричної бази, найдоцільнішим є застосування світловимірювальних ламп типу СИС, які були аттестовані по СЩЕЯ. Їх перевагами є висока стабільність відтворення одиниці, довговічність, простота експлуатації, прийнятна оптична потужність. Ці випромінювачі, завдяки високим метрологічним характеристикам, використовуються в діючому еталоні кандели, а також як зразкові засоби в системах перенесення одиниці еталона. Крім того, при використанні світловимірювальних ламп можливе додаткове калібрування установки по силі випромінювання (з перерахунком на габаритну енергетичну яскравість). Хоча такий спосіб є менш точним, його можна застосовувати для попередньої оцінки характеристик випромінювачів. Залежно від точності компаратора, похибка передачі одиниці СЩЕЯ від ламп типу СИС може складати (2-8) %, що є цілком прийнятним. Наприклад похибка передачі одиниці СЩЕЯ при калібруванні системи ТМ супутника Landsat і системи SPOT/HRV склала близько 6,8 % [240].

Як вторинний еталон або зразковий випромінювач установки можна також використовувати стрічкові лампи типу СИРШ, але їх стабільність гірша, ніж у світловимірювальних ламп, а випромінювана потужність є меншою, що вимагає розширення динамічного діапазону компаратора і, як наслідок, приведе до зниження точності.

Враховуючи рівні калібрувальних сигналів, а також розглянуті раніше методи вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС, для калібрування випромінювачів установки можна рекомендувати перевірочну схему, показану на рис. 5.8.

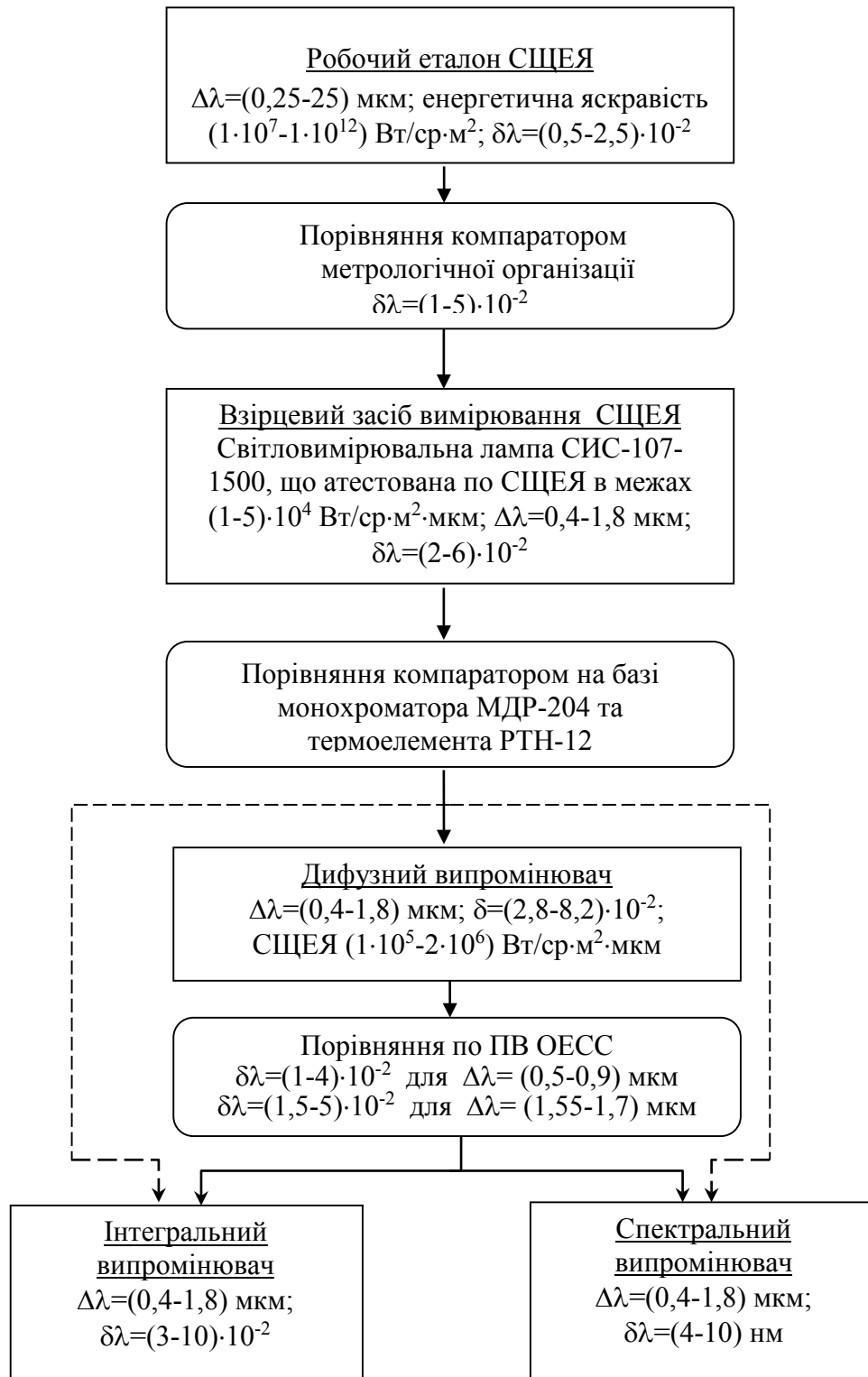


Рис. 5.8. Перевірочна схема для вимірювальної установки

Відповідно до неї, ДфВ використовується як вторинний еталон установки. Спочатку визначається чутливість всіх пікселів МПВ за середніх умов освітленості, а потім вимірюється ФПС кількох пікселів у всьому динамічному діапазоні. Отримані результати з відповідними поправками екстраполюються на решту пікселів. Перенесення одиниць яскравості від ДВ до інтегрального випромінювача здійснюється, таким чином, через ПВ ОЕСС. Аналогічно калібрується і спектральний випромінювач.

Запропонована схема дозволяє проводити перенесення одиниці СЩЕЯ від вторинного еталона установки до інтегрального і спектрального випромінювачів через компаратор.

Можлива схема вимірювального стенду, що реалізує розглянуті вище методи вимірювань, показана на рис. 5.9 [222].

Основними особливостями схеми стенду є:

- наявність калібрувального блоку, що дозволяє проводити періодичне калібрування випромінювачів як по ДфВ так і по еталонному випромінювачу (в схемі на рис. 5.8 цей зв'язок позначено пунктирною лінією);
- вимірювальний і калібрувальний блоки функціонально і конструктивно з'єднані, що дозволяє зберегти метрологічну конфігурацію і параметри установки постійними. При цьому поліпшується повторюваність вимірювань;
- відсутнє переміщення основних елементів вимірювальної схеми – сполучення здійснюється через комутуюче дзеркало, що зменшує похибку геометричної прив'язки.

Режими роботи установки:

- комутуюче дзеркало 9 в положенні I, плоске дзеркало 13 – в положенні I. ДфВ підключено до компаратора – передача одиниці СЩЕЯ від компаратора до ДфВ;
- плоске дзеркало 13 в положенні II. Еталонний випромінювач підключений до компаратора – передача одиниці СЩЕЯ від еталонного випромінювача до компаратора;

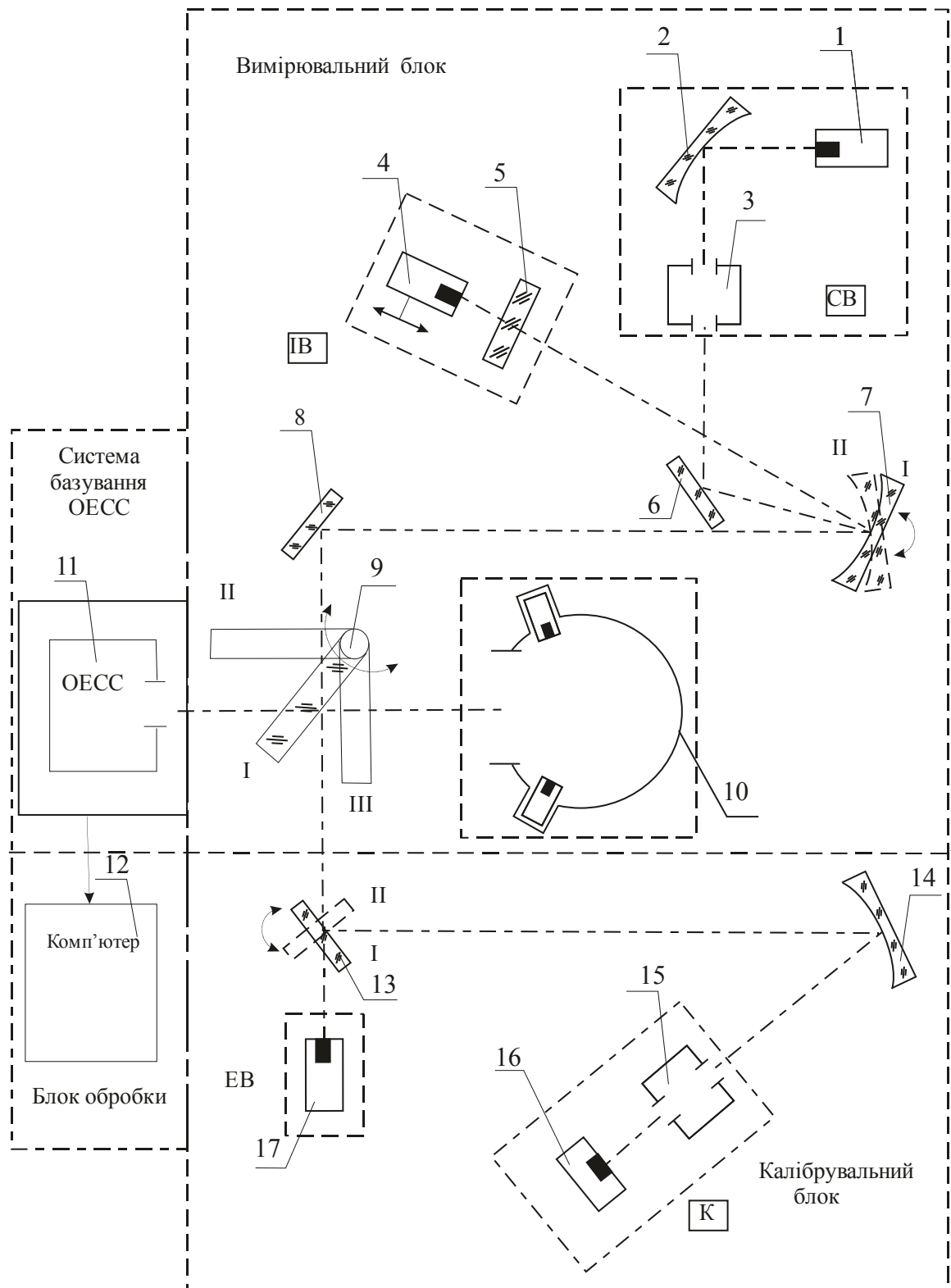


Рис. 5.9. Структурна схема вимірювального стенду: 1, 4, 17 – ДВ; 2 – конденсор; 3, 15 – монохроматори; 5 – розсіююча площадка; 6, 8, 13 – плоскі дзеркала; 7 – об’єктив коліматора; 9 – комутуюче дзеркало; 10 – ДфВ; 11 – ОЕСС; 12 – блок обробки сигналу; 14 – фокусуючий об’єктив; 16 – ПВ; ЕВ – еталонний випромінювач; К – компаратор; СВ – спектральний випромінювач

- комутуюче дзеркало 9 в положенні II. ДфВ підключено до ОЕСС – вимірювання зонної характеристики;
- комутуюче дзеркало 9 в положенні I, коліматорний об’єктив 7 в положенні I. Інтегральний випромінювач підключений до ОЕСС - вимірювання функції передачі сигналу;
- комутуюче дзеркало 9 в положенні I, коліматорний об’єктив 7 в положенні II. Спектральний випромінювач підключений до ОЕСС – вимірювання спектральної характеристики;
- комутуюче дзеркало 9 в положенні III, вимірювальний блок підключений до калібрувального. Калібрування інтегрального та спектрального випромінювача по еталонному випромінювачу.

Еквівалентні вимірювальні схеми, які реалізують ці режими, показані на рис. 5.10.

Для живлення ДВ доцільно використовувати стабілізовані по струму блоки живлення БП-120 ВНИИОФИ (еталонний випромінювач) і МТКС-15 і МТКС-30 (інтегральний випромінювач і ДфВ).

Звичайно, що конфігурація і склад установки залежатимуть від комплектації і розміщення устаткування в умовах конкретної лабораторії. Зокрема, з схеми можна вивести калібрувальний блок і комутуюче дзеркало, а ДфВ вводити у вимірювальний тракт переміщенням (по аналогії з установкою «Камелія»). Плоскі дзеркала, що визначають геометрію схеми, можуть розташовуватися в інших точках і їх кількість може бути іншою.

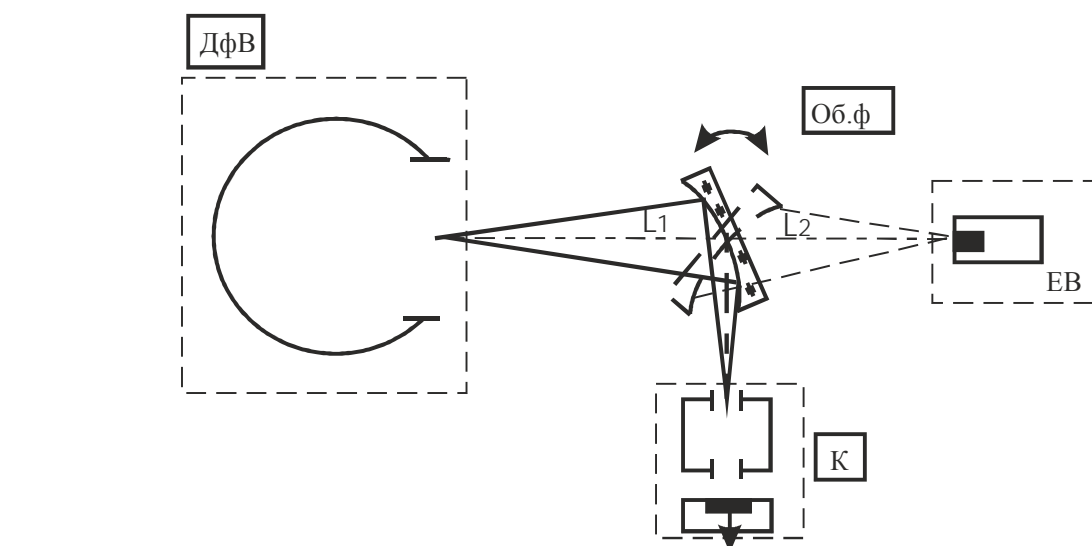
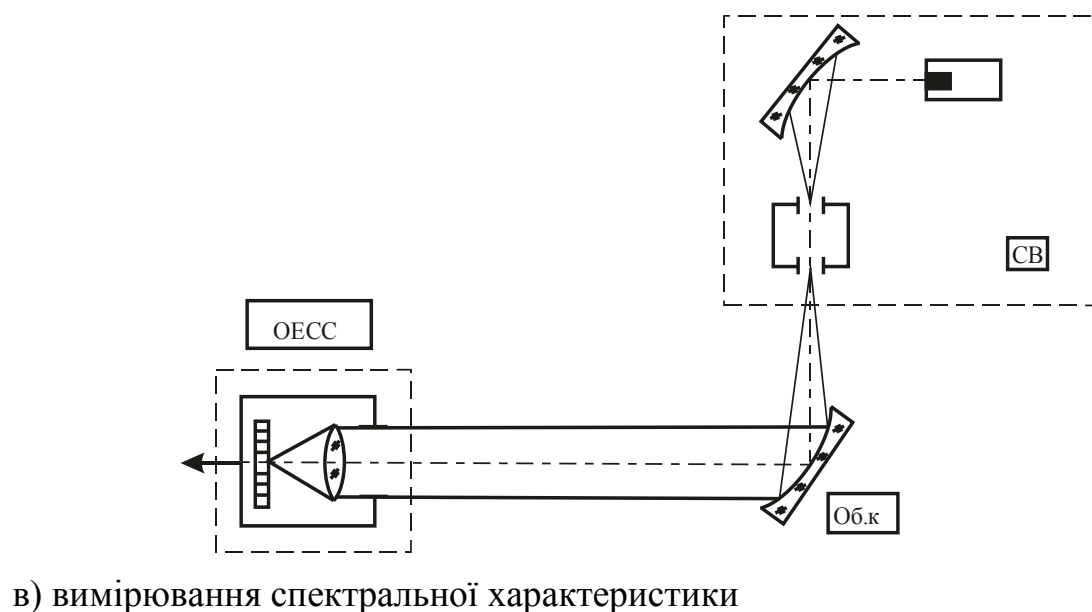
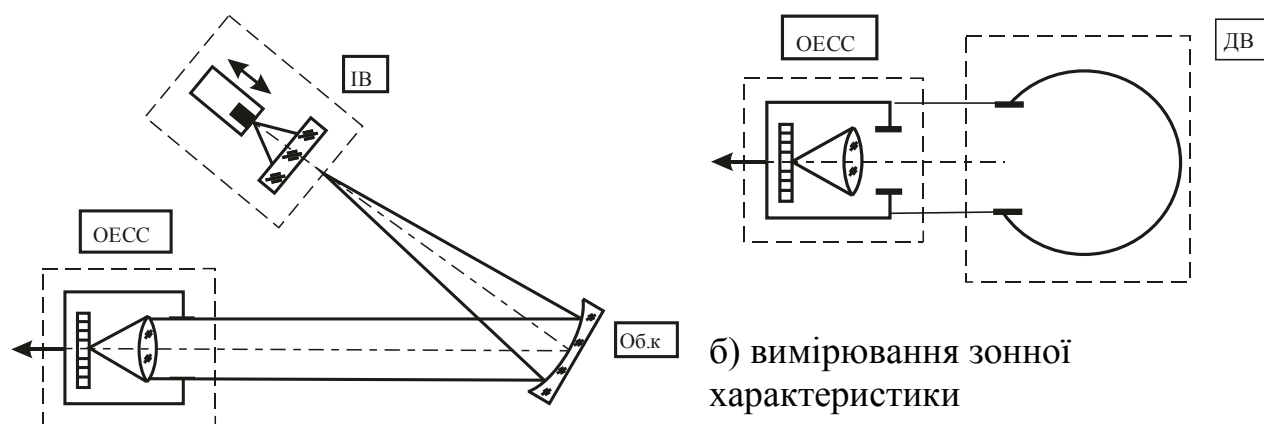


Рис. 5.10. Еквівалентні вимірювальні схеми: Об.к. - об'єктив коліматора; Об.ф. - об'єктив фокусуючий; К - компаратор; ЕВ - еталонний випромінювач; СВ – спектральний випромінювач

5.6 Похибки вимірювань

Сумарна похибка вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС на розглянутій схемі містить похибки метрологічних засобів стенду і інструментальну похибку ОЕСС.

З урахуванням статистичної незалежності похибок градувань випромінювачів сумарна випадкова похибка δ вимірювання характеристик може бути розрахована як [242]

$$\delta = k_{\beta} \sqrt{\sum \delta_i^2}, \quad (5.8)$$

де k_{β} - коефіцієнт, що враховує величину довірчої ймовірності ($k_{\beta} = 1,1$ при $\beta = 0,95$); δ_i - складові похибок.

Тоді окремі складові похибок можна розрахувати таким чином.

Похибка вимірювання відносної ФПС ОЕСС $\delta_{\text{ФПС}_\theta}$

$$\delta_{\text{ФПС}_\theta} = k_{\beta} \sqrt{\delta_z^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_o^2}, \quad (5.9)$$

де δ_z - похибка градування інтегрального випромінювача; δ_{θ} - геометрична похибка базування; δ_o - похибка обробки вихідного сигналу. Оцінка дає величину 2,7 %.

Похибка вимірювання ФПС в абсолютних величинах $\delta_{\text{ФПС}_a}$

$$\delta_{\text{ФПС}_a} = k_{\beta} \sqrt{\delta_{ei}^2 + \delta_z^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_o^2}, \quad (5.10)$$

де δ_{ei} - похибка перенесення одиниці від вторинного еталона до інтегрального випромінювача. Оцінка $\delta_{\text{ФПС}_a}$ дає величину 7,12%.

Похибка вимірювання відносної спектральної характеристики $\delta_{\text{св}}$

$$\delta_{\text{св}} = k_{\beta} \sqrt{\delta_c^2 + \delta_{\theta}^2 + \delta_o^2}, \quad (5.11)$$

де δ_c - похибка градування спектрального випромінювача. Оцінка $\delta_{\text{св}}$ дає величину 3,6 %.

Похибка вимірювання спектральної характеристики в абсолютних величинах

δ_{ca}

$$\delta_{ca} = k_{\beta} \sqrt{\delta_{ec}^2 + \delta_c^2 + \delta_o^2 + \delta_o^2}, \quad (5.12)$$

де δ_{ec} - похибка передачі одиниці від вторинного еталона до спектрального випромінювача. Оцінка δ_{ca} дає величину 7,54 %.

Похибка вимірювання відносної зонної характеристики δ_{36}

$$\delta_{36} = k_{\beta} \sqrt{\delta_d^2 + \delta_o^2 + \delta_o^2}, \quad (5.13)$$

де δ_d - похибка градуювання ДфВ. Оцінка δ_{36} дає величину 1,9 %.

Приведені оцінки похибок є попередніми і відносяться до випадкової компоненти. Оцінка систематичних помилок елементів вимірювальної установки може бути виконана тільки після її остаточного складання і юстування. Проте практика показує, що величина сумарної систематичної похибки може у декілька разів перевищувати випадкову компоненту і потрібна серйозна робота по її виключенню або мінімізації.

Сумарна похибка вимірювання енергетичних характеристик на розглянутому стенді містить похибку метрологічних засобів і інструментальну похибку ОЕСС. Основні складові похибки установки і їх якісна оцінка, що виконана на основі приведенного раніше аналізу, подані в табл. 5.3. Там же для порівняння наведено похибки найближчого аналога - установки «Камелія», що використовується для атестації ОЕСС «Ресурс» [241].

Таблиця 5.3

Основні складові похибок вимірювальних стендів (довірча ймовірність $\beta=0,95$)

№ п/п	Складові похибок	Величина похибки, %	
		Стенд	
		Розроблена	«Камелія»
1	Похибка передачі одиниці СЩЕЯ: - при використанні вторинного еталона, Δ_e ; - при використанні робочих засобів вимірювання, Δ_{ep}	2,0 7,0	- 6,5
2	Похибка градуювання дифузного освітлювача	4,0	3,5
3	Похибка градуювання монохроматичного освітлювача, Δ_m	5,0	4,0
4	Похибка геометричного базування ОЕСС, Δ_b	1,0	-
5	Похибка вимірювання вихідного сигналу ОЕСС, Δ_v	0,5	0,4

Похибки 1, 2, 3 і 5 є чисто випадковими, а похибка 4 містить як випадкову, так і систематичну компоненти, причому остання звичайно усувається при вимірюваннях. Враховуючи те, що в запропонованому стенді забезпечено практично повну ідентичність розповсюдження випромінювання як при вимірюваннях, так і при калібруванні, похибку геометричного об'єднання метрологічних засобів можна вважати малою у порівнянні з іншими складовими і в подальшому не враховувати.

Внаслідок розмаїття конкретних конструкцій ОЕСС, оцінка їх інструментальних похибок є окремою задачею і виходить за рамки даної роботи.

Висновки до розділу 5

1. Досліджено елементну базу апаратури для вимірювання енергетичних характеристик ОЕСС. Виконано порівняльний аналіз принципів побудови фотометричних приладів, які створюють змінну освітленість на вхідній зіниці ОЕСС для вимірювання ФПС, спектральної та зонної характеристик. Обґрунтовано елементну базу вимірювального стенду, яка є доступною в Україні та може забезпечити прийнятні метрологічні характеристики вимірювального стенду.

2. Розроблено новий метод вимірювання основних енергетичних характеристик спектральних каналів ОЕСС. На базі цього методу розроблені засоби проектування вимірювального стенду з використанням оригінального дифузного випромінювача змінної яскравості. Теоретично і експериментально показано, що запропонований метод забезпечує кращі метрологічні характеристики енергетичного калібрування ОЕСС в порівнянні з відомими методами і установками.

3. Запропоновано нову схему стенду для вимірювання енергетичних характеристик спектральних каналів ОЕСС. Вимірювальна схема має такі переваги:

- атестація всіх елементів стенду проводиться від одного робочого еталона, чим досягається єдність схем калібрування та передачі розміру СЩЕЯ;

- в стенді забезпечено ідентичність розповсюдження випромінювання як при калібровці, так і при вимірюваннях, що зменшує похибки геометричного сполучення елементів і абсолютизації відносних шкал;

- застосування дифузного освітлювача зі змінною яскравістю забезпечує більший динамічний діапазон градуювальної характеристики, ніж відомі аналоги при однакових габаритах.

РОЗДІЛ 6

КОМПЛЕКСУВАННЯ ТА ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ ЗА РІЗНИХ УМОВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Даний розділ присвячено експериментальному дослідженню запропонованих методів обробки зображень в ОЕСС та оцінці ефективності розроблених способів узгодження основних характеристик блоків ОЕСС. Розглянуто методи паралельного комплексування в ОЕСС у складі оптико-електронних інформаційних каналів, а також оптико-електронного та оптичного каналів. Проаналізовано можливості послідовної обробки зображень в ОЕСС для компенсації вібрацій та підвищення просторового розділення. Розглянуто питання підвищення швидкодії засобів обробки зображень в ОЕСС з комплексуванням.

6.1 Стратегія комплексування інформації в ОЕСС дистанційного спостереження

Стратегія комплексування повинна враховувати всі основні ланки інформаційного комплексу «ФЦО - ОЕСС - оператор» та умови його функціонування [243, 244]. Комплексування передбачає два основних етапи: реєстрацію і безпосереднє злиття зображень. На етапі реєстрації, перш за все, повинні бути враховані відмінності кутів поля зору і форматів МПВ кожного каналу. На етапі злиття повинна бути врахована візуальна інформативність кожного каналу. З цією метою доцільно за аналогією з картою рішень Блума (decision map) [245], формувати двовимірну карту інформативності. Карта інформативності базується на показнику інформативності, який враховує:

- 1) особливості формування сигналів в ТВ і ТПВ каналах;
- 2) ФЦО, а саме спектро-енергетичні і просторово-енергетичні характеристики об'єктів, фонів, міру подібності об'єкта і фону, контраст «об'єкт - фон», зовнішні умови функціонування ОЕСС (час доби, стан атмосфери, рівень освітленості);
- 3) завдання спостереження (пошук, виявлення, розпізнавання);
- 4) психофізіологічні особливості зорового сприйняття оператора.

Разом з картою інформативності визначається спектральний канал, який є основним при злитті зображень. Для забезпечення можливості аналізу й оптимізації ОЕСС показник інформативності має бути сумісним із математичною моделлю системи «ФЦО – ОЕСС – оператор».

Важливим питанням є вибір методу злиття зображень в залежності від поточної задачі та умов функціонування інформаційної системи. Адаптивність комплексування зображень забезпечується апостеріорною оцінкою якості комплексованих різними методами зображень й вибором алгоритма злиття, який дає найвищий показник інформативності. Доцільно при цьому використовувати той же показник, що і при створенні карти інформативності.

6.2 Реєстрація зображень в спектральних каналах

Результатом реєстрації є точне просторове суміщення зображень в каналах ОЕСС [25]. Цього досягають двома шляхами – конструктивно суміщенням оптичних осей у вхідному блоці ОЕСС і програмно під час комплексування інформації. Для ОЕСС з однотипними ПВ, наприклад, пари «кольорова або чорно/біла ПЗЗ камера – низькорівнева ПЗЗ камера» або «спектральні ПЗЗ камери низького розділення – панхроматична ПЗЗ камера високого розділення», просторове суміщення виконується відносно просто. Тому що, по-перше, зображення в кожному каналі семантично не відрізняються; по-друге, фізичні формати ПВ каналів також мало відрізняються між собою. У випадках, коли в ОЕСС значно відрізняються ПВ каналів, зіставлення зображень суттєво ускладнюється. Якщо деякий набір релевантних елементів зображення, таких як контури, кути, точки або інші геометричні примітиви містяться в кожному з зображень, то програмне суміщення відбувається ефективно і безвідносно до контрасту і шумових складових в зображеннях [246, 247]. Але часто релевантні елементи зображень одного каналу можуть бути відсутні в другому, або можуть мати відмінний характер. В цьому разі доводиться застосовувати непрямі методи

суміщення зображень. Ймовірно, що ефективність конкретного обчислювального методу залежить від фізичного суміщення полів зору каналів.

Одним з найпоширеніших типів багатоканальних ОЕСС наразі є системи у складі ТВ і ТПВ ($\Delta\lambda=8-14$ мкм) каналів. Релевантні ознаки зображень в каналах таких систем можуть бути значно відмінними, оскільки ТПВ канал відображає інформацію здебільшого про внутрішній стан об'єкта спостереження.

Найбільш вживані схеми оптичного суміщення в багатоканальних ОЕСС, що працюють за поділом по амплітуді, або за поділом по фронту потоку випромінювання, наведені в першому розділі.

Для дослідження методів паралельного комплексування інформації в дистанційних спостереженнях, було створено кілька макетних зразків багатоканальної ОЕСС у складі ТПВ камери і ТВ камери. Перший макет (рис.6.1) був призначений для лабораторних вимірювань. В ньому застосовано метод розділення амплітуди потоків.



Рис. 6.1. Загальний вигляд макету багатоканальної ОЕСС для лабораторних вимірювань

Спектральний канал $\Delta\lambda_2=(7,5-13,0)$ мкм реалізовано на основі тепловізійної камери FLIR 301 з мікроболометричним МПВ, а в ТВ каналі використовувалась чорно/біла ПЗЗ камера РІН-750. Мікроболометричний МПВ має 320×240 пікселів з

розміром 35×35 мкм². При цьому кутове поле зору камери становить 30° . Технічні параметри ТВ камери: діаметр входної зіниці – $D = 22$ мм; фокусна відстань об'єктива – $f' = 12$ мм; поле зору – 36° ; розмір пікселя МПВ – $v_D \times w_D = 7 \times 7$ мкм²; робочий спектральний діапазон – $\Delta\lambda_2 = (0,4 - 0,85)$ мкм.

Оптичне суміщення каналів здійснювалось з допомогою дихроїчного світлоподільника. Зображення ТВ каналу вводилось в комп'ютер, а ТПВ зображення паралельно запам'ятовувалось у власному блоці обробки камери і вводилось в комп'ютер для відображення на моніторі LG FL L1730s з розміром елемента $0,264 \times 0,264$ мм² та середньою яскравістю екрана 35 кд/м².

Другий варіант лабораторного макету двоканальної ОЕСС також містив спектроподільник (рис. 6.2), а ТПВ канал було побудовано на основі мікроболометричної камери Thermal-eye. Технічні параметри ТПВ камери Thermal-eye: діаметр входної зіниці – $D = 26$ мм; фокусна відстань лінзового об'єктива – $f' = 16$ мм; розмір пікселя ПВ – $v_D \times w_D = 30 \times 30$ мкм²; робочий спектральний діапазон – $\Delta\lambda_2 = (7 - 14)$ мкм; формат МПВ – 160×120 .

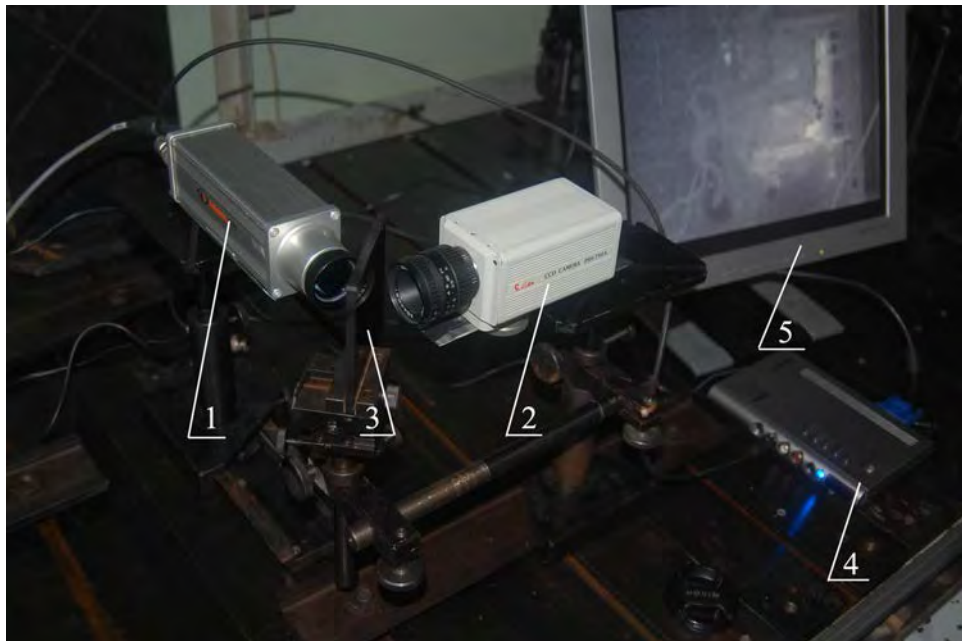


Рис. 6.2. Зовнішній вигляд лабораторного макету двоканальної ОЕСС:

1 – ТПВ камера; 2 – ТВ камера; 3 - спектроподільник; 4 – ТВ тюнер; 5 – монітор

Для вимірювань в польових умовах (коли паралакс спектральних каналів є несуттєвим) доцільно суміщувати канали за рахунок поділу фронту оптичного випромінювання. Зовнішній вигляд макету в цьому випадку показано на рис. 6.3. для досягнення автономності роботи в ТПВ каналі використовувалась камера FLIR 301, а в ТВ каналі – ТВ камера Sony HDR-CX560E. Технічні параметри ТВ камери: діаметр входної зіниці – $D = 37$ мм; фокусна відстань лінзового об'єктива – $f' = 38$ мм; розмір пікселя ПВ – $v_D \times w_D = 2 \times 2$ мкм²; робочий спектральний діапазон – $\Delta\lambda_2 = (0,4 - 0,95)$ мкм; формат КМОН МПВ – 2336x1314.



Рис. 6.3. Зовнішній вигляд польового макету двоканальної ОЕСС

В загальному випадку проекція полів зору каналів в простір предметів має вигляд, зображений на рис.6.4. Можна виділити три похибки просторового суміщення полів зору: поперечне зміщення оптичних осей ΔO_{12} , поворот матриць ПВ і різниця періоду просторової дискретизації в каналах. У практиці звичайного послідовного використання двоканальних ОЕСС при дистанційних спостереженнях вказані похибки зменшуються таким чином: кутові поля каналів встановлюються максимально однаковими, а кутова відстань між оптичними осями

і нахил растрів ПВ мінімізуються безвідносно до розмірів пікселів. В разі комплексування інформації в ОЕСС вимоги до точності суміщення мають формуватися виходячи з алгоритму комплексування. В експерименті за допомогою тест-об'єкта поля зору каналів попередньо суміщались з точністю $\Delta O_{12} = \pm 2$ пікселя ТПВ каналу і $\delta O_{12} = \pm 1^\circ$ (що дорівнює приблизно лінійному зміщенню на краю кадру ТПВ каналу ± 2 пікселя) [23].

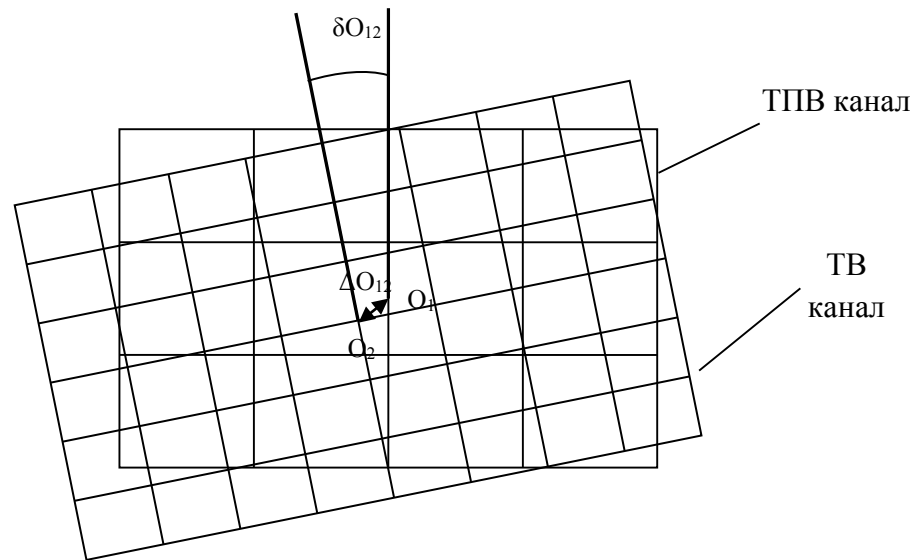


Рис. 6.4. Похибки суміщення полів зору

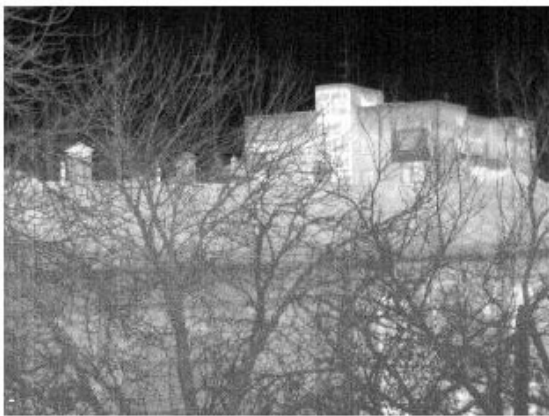
Інформація в каналах зазвичай має форму двох паралельних відеопослідовностей, кожна з яких містить окремі повні кадри. Для сумісної обробки сигналів двох амплітудних матриць, якими є кадри, можна застосувати один з показників подібності. Наприклад, коефіцієнт кореляції [248], показник спільної інформації (mutual information) [249], статистичну розбіжність [250] тощо.

Показник взаємної інформації MI як ентропійна міра взаємної залежності двох випадкових дискретних сигналів A і B (а саме такі сигнали формуються матричними ПВ) має вигляд

$$MI(A, B) = \sum_i \sum_j P(A_i, B_j) \log_2 \frac{P(A_i, B_j)}{P(A_i) \cdot P(B_j)} \quad (6.1)$$

де $P(A_i, B_j)$ - умовна ймовірність реалізацій A і B ; $P(A_i)$, $P(B_j)$ - безумовні ймовірності реалізацій A і B .

Цей показник останнім часом набуває все більшої популярності і видається доцільним його використання при остаточній постобробці зображень. Для перевірки цього твердження був проведений натурний експеримент з реєстрацією змістовного зображення міського ландшафту (рис. 6.5). Він підтвердив ефективність показника MI для суміщення зображень за наявності контрастних релевантних елементів. Причому програмне суміщення було досить ефективним навіть при збільшенні ΔO_{12} до ± 4 і δO_{12} до $\pm 2^\circ$ [23].



а) діапазон $\Delta\lambda_2=(7,5-13,0)$ мкм



б) діапазон $\Delta\lambda_1=(0,45-0,8)$ мкм

Рис. 6.5. Зображення будівлі в двох спектральних каналах ОЕСС

Лабораторний макет двоканальної ОЕСС за рис. 6.1 використовувався також для реєстрації інформації при дослідженнях теплової складової окислювально-відновних процесів організму людини шляхом визначення місця обміну O_2 і CO_2 в момент відкриття капіляра [100]. Для підвищення точності визначення температурного розподілу шкірного покриву в запропонованому методі проводяться вимірювання в двох спектральних піддіапазонах. Фактично за допомогою світлофільтрів на базі двоканальної ОЕСС формувався біхроматичний пірометр. У видимому та ближньому ІЧ спектральному діапазоні ОЕСС сприймає інтегральний потік випромінювання, що містить значну частину відбитого від шкіри сигналу. У другому спектральному діапазоні сигнал складається в основному з власного випромінювання шкіри. В якості основного інформаційного сигналу використовувався інтегральний потік випромінювання другого діапазону. Сигнал першого каналу дозволяв відстежувати зміни зовнішнього випромінювання шкіри і вносити відповідні поправки в основний сигнал. Перед проведенням

термографічних вимірювань за допомогою спеціальної термокабіни, куди містився об'єкт дослідження, створювались умови, коли температура навколишнього середовища була меншою температури об'єкта дослідження, а також виключались конвекція та нерівномірне опромінення об'єкта.

Введення в діагностичний комплекс ТВ каналу дозволяє подавати результати в більш наочному вигляді [251]. На рисунку 6.6, а) показано ТВ зображення людини у діапазоні $\Delta\lambda_1=(0,4-0,85)$ мкм, а на рисунку 6.6, б) – зображення у ТПВ діапазоні $\Delta\lambda_1=(7,5-13,0)$ мкм з відповідним термопрофілем (Li1) досліджуваної ділянки шкірного покриву. Температура у виділеній області відповідає $34,3^{\circ}\text{C}$ (див. криву термопрофілю, рис. 6.5, в)), що може бути наслідком порушення кровообігу.

Експериментальні дослідження виявлення порушення кровообігу людини показали ефективність реєстрації в двох каналах з використанням показника MI [252].

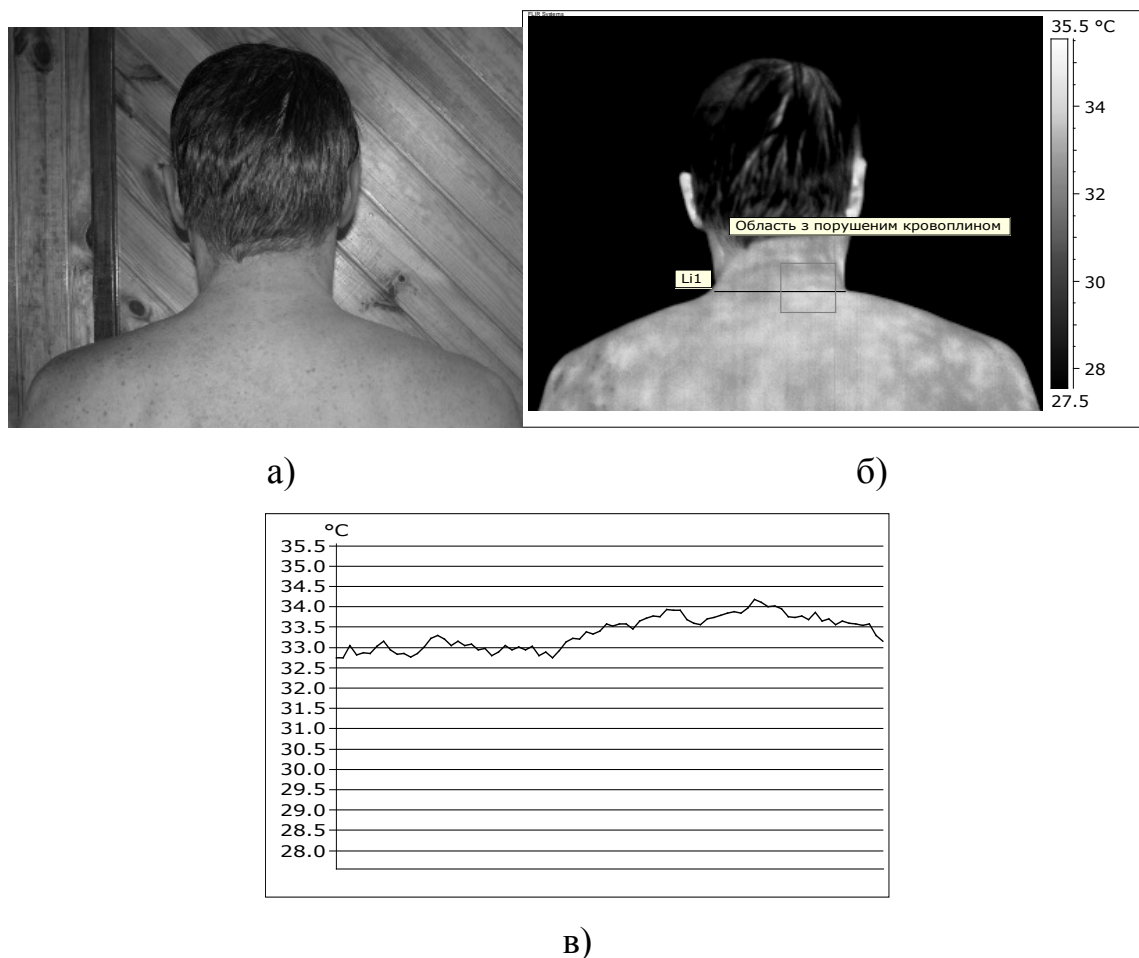


Рис. 6.6. Реєстрація зображень в двоканальній ОЕСС: а) ТВ канал, б) ТПВ канал, в) термопрофіль в області з порушенням кровообігу

6.3 Паралельне комплексування зображень в ОЕСС

Як сказано раніше, на практиці використовуються два режими роботи двоканальної ОЕСС – паралельний і послідовний. Зазвичай складні алгоритми обробки зображень використовуються при відкладеному в часі комплексуванні (як правило – послідовному), а для відображення інформації в реальному масштабі часу застосовуються найпростіші алгебраїчні алгоритми комплексування [253, 254]. Прості алгоритми комплексування є ефективними здебільшого при спостереженнях об'єктів на рівномірних фонах. Для виявлення та розпізнавання об'єктів у складних ФЦО без суттєвого ускладнення ОЕСС доцільнішим може виявитись використання послідовного режиму роботи каналів.

Були проведені кілька серій експериментів в лабораторних та польових умовах. Оцінка ефективності розроблених методів проводилась як за відомими об'єктивними показниками якості, так і за оригінальними. Для однієї серії експериментів крім стандартних для комплексування показників розраховані ймовірнісні характеристики виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів. Розрахункові оцінки порівнювались з результатами суб'єктивних експертиз.

Приклад зображень, отриманих з двоканальної ОЕСС міського ландшафту в умовах туману взимку, показані на рис.6.7.



а) ТВ канал



б) ТПВ канал

Рис. 6.7. Зображення залізничної сортувальної станції

Було встановлено, що на близьких дистанціях візуальне виявлення і візуальне

розпізнавання об'єктів ефективніше при роботі з ТВ каналом. При збільшенні відстані спостереження переваги ТВ каналу зменшувались. На великих відстанях видимий канал практично ставав неефективним: стан будівель на горизонті (відстань спостереження (850 – 900) м) цілком задовільно оцінювався по ІЧ зображенню, в той час, як видимий канал не давав змоги їх навіть виявити. Головними причинами такої ситуації очевидно є, по-перше, більш різкий спад коефіцієнта пропускання атмосфери в умовах туману на короткохвильових ділянках спектру; по-друге, перевага для заданих погодних умов теплових контрастів над видимими для штучних об'єктів, які мають джерела енергії. Ймовірно, що другий фактор залежить від часу дня, кліматичних і сезонних умов [253].

За даними експерименту було проведено комп'ютерне моделювання. Порогове значення візуального відношення сигнал/шум μ_n було прийнято рівним 3,5, постійна часового інтегрування зорової системи становила $\eta_t=2$. Коефіцієнт пропускання атмосфери розраховувався як добуток трьох спектральних коефіцієнтів: молекулярного поглинання газами, аерозольного ослаблення і молекулярного розсіяння за методикою і таблицями, що наведені в [255]. Об'єктом спостереження вибрано прямокутник 2×3 м² з температурою поверхні +10°C і постійним у всьому спектральному діапазоні роботи коефіцієнтом відбиття $\rho=0,3$. Фон вважався рівномірним з температурою -2°C, висота Сонця 30°, температура повітря -8°C.

Проведене чисельне моделювання показало, що залежність ймовірності виявлення від дистанції спостереження для ТВ та ТПВ каналів мають точку перетину (рис. 6.8).

Зміна ведучого каналу в двоканальній ОЕСС здійснюється при помітному зменшенні кількості релевантних ознак в одному з каналів. Наприклад, при спостереженнях в тумані, диму об'єктів, які розміщені на різних відстанях від ОЕСС. За таких умов ефективність візуального спостереження ТВ або ТПВ зображень змінюватиметься і може виникнути доцільність використання не тільки видимого, але й ТПВ каналу. Суттєві обмеження на прості арифметичні методи

комплексуювання накладають досить часті випадки реверсивних контрастів однакових об'єктів в різних каналах. Наприклад, контрасти в видимому діапазоні спектру вранці та ввечері є майже однаковими, а в ІЧ діапазоні більш масивні тіла ввечері мають додатній контраст за рахунок накопиченої енергії, а вранці – від'ємний. Відповідно, комплексуювання складанням дасть в різний час доби неоднакові результати.

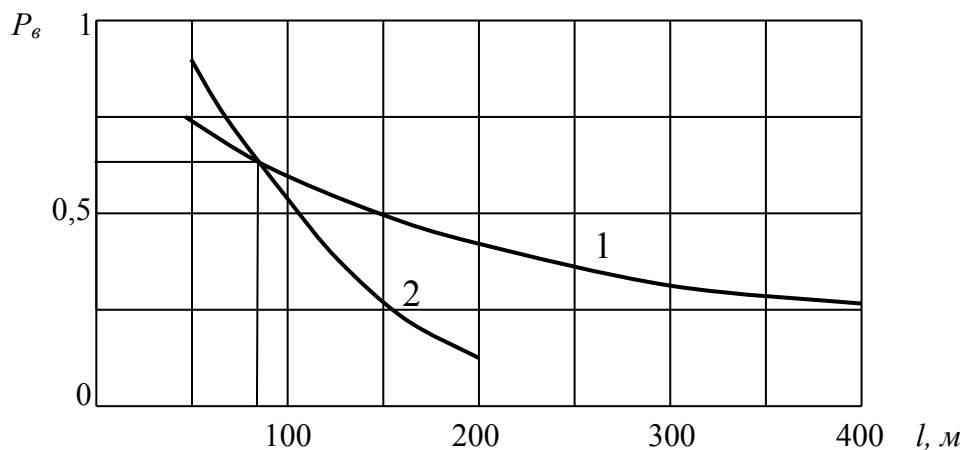


Рис. 6.8. Ймовірність виявлення об'єкта в тумані: 1 – ТПВ канал; 2 - ТВ канал

В системах з слабкою статистичною залежністю між сигналами каналів часто інформативна якість каналів є різною і апіорно невідомо, який з каналів слід вважати основним. Очевидно, що в цьому разі алгоритм комплексуювання має враховувати процедуру прийняття рішень кінцевою ланкою всієї інформаційної системи (в випадку іконічних систем необхідно враховувати особливості зорового сприйняття оператора).

6.3.1 Дослідження методів комплексуювання спектральних каналів

Для вибору найкращого методу комплексуювання при дистанційних спостереженнях з допомогою двоканальних ОЕСС було досліджено найпоширеніші методи злиття зображень. Серія комплексованих зображень залізничної сортувальної станції, отриманих з ТВ та ТПВ зображень рис. 6.7, а), б),

показана на рис. 6.9 в) – і). Вихідні зображення ФЦО отримано при посиленні інтенсивності туману і суттєвому зниженні контрасту ТВ зображення.



(а) Усереднення



(б) Метод головних компонент



(в) Виділення максимуму



(г) Виділення мінімуму



(д) Піраміда Лапласа



(е) Піраміда ФВП



(є) Піраміда відношення



(ж) Контрастна піраміда



(з) Градієнтна піраміда



(и) Вейвлет перетворення



(і) Інваріантне до зсувів вейвлет перетворення



(ї) Морфологічна піраміда

Рис. 6.9. Комплексовані зображення

Фактично, внаслідок того, що ТПВ канал був основним, а ТВ канал формував зображення мінімального контрасту, всі злиті зображення забезпечують поліпшену ситуаційну обізнаність. Суб'єктивна експертиза показала, що методи злиття з використанням піраміди Лапласа та інваріантного до зсувів вейвлет перетворення випереджають інші методи за якістю візуального сприйняття. Вони ясно показали будівлю, дорогу і текстуру. Найпростіші методи усереднення та вибору

максимуму/мінімуму дають найгірші результати. З врахуванням того, що ТПВ зображення, як правило, є контрастним, у випадку домінування в результуючому зображенні інформації ТВ каналу можна очікувати маскуванню низьоконтрастного ТВ зображення високого розділення контрастним ТПВ зображенням низького розділення.

6.3.2 Створення карти інформативності в багатоканальних ОЕСС

При паралельному комплексуванні один з інформаційних каналів ОЕСС є основним, а інший - допоміжним. Наприклад, для енергоаудиту будинків досить одного ТПВ і одного ТВ каналу, причому ТВ канал використовується як додатковий для координатної прив'язки [256] (рис. 6.10, 6.11).

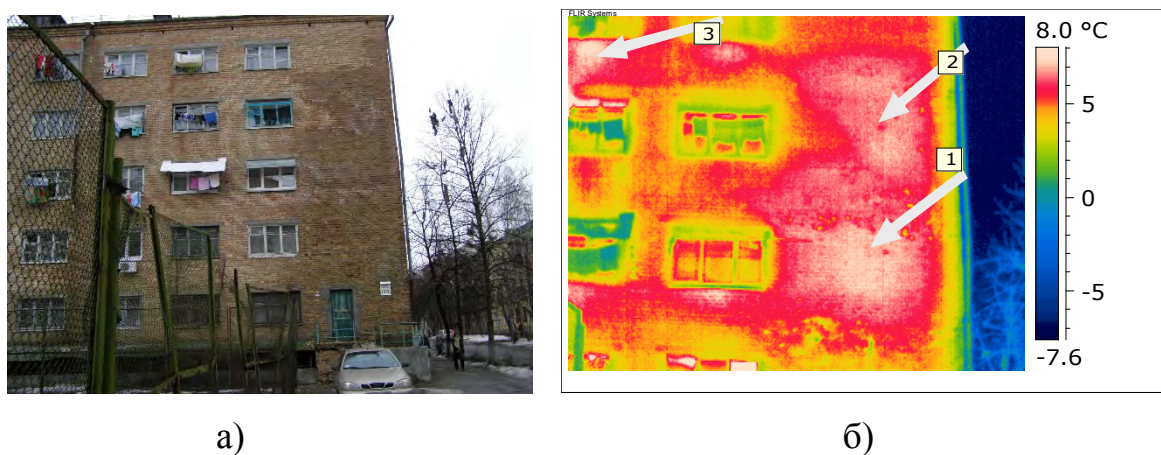


Рис. 6.10. Зйомка будинку гуртожитку: а) – ТВ канал; б) – ТПВ канал

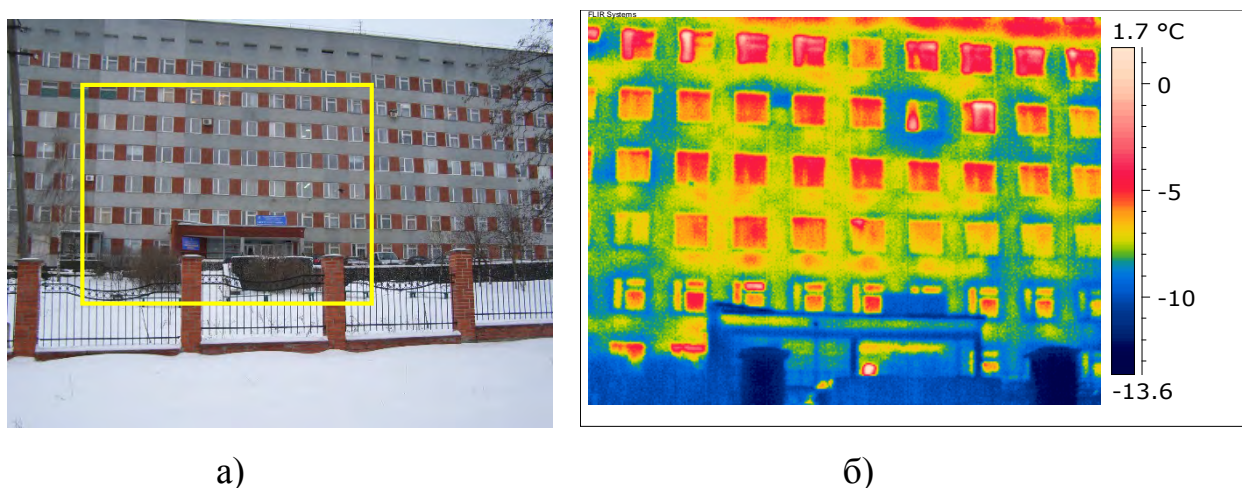


Рис. 6.11. Зйомка хірургічного корпусу лікарні: а) – ТВ канал; б) – ТПВ канал

В таких випадках ОЕСС працює в послідовному режимі і комплексування зображень зазвичай непотрібне.

У ОЕСС з комплексуванням вибір основного (ведучого) каналу не є очевидним, позаяк інформативність сигналів в каналах може швидко змінюватись. Крім того, одним з проблемних питань в цьому випадку є обсяг часу, який потрібно для виконання обчислень.

Одним із способів вдосконалення методів комплексування ТВ та ТПВ зображень в ОЕСС, який дозволяє підвищити інформативність обробленого зображення за менших затрат часу є використання карти інформативності.

Карта інформативності, на відміну від карти рішень Блума [245], може бути використана не тільки для безпосереднього комплексування зображень, але і для координатного суміщення зображень (при їх реєстрації). З цією метою в якості показника інформативності можна вибрати, наприклад, контури об'єктів ТВ і ТПВ зображень. Для визначення контурів об'єктів доцільно використовувати метод Кенні [257]. Отримавши контури зображень і карту інформативності, можна виконати координатне поєднання зображень, наприклад, за допомогою методу нормалізованої взаємної кореляції.

Знайшовши частину зображення в ТВ каналі, яка відповідає зображенню в ТПВ каналі, вирізаємо її. Після чого об'єднуємо інформацію ТПВ каналу і відповідної частини ТВ каналу за допомогою піраміди Лапласа: спочатку здійснюється багатомасштабний розклад вхідних зображень (MST - multiscale transform), потім отримані коефіцієнти об'єднуються за певними правилами, утворюючи багатомасштабний розклад результуючого зображення; саме результуюче зображення отримують шляхом зворотного багатомасштабного розкладу (MST^{-1}).

З метою визначення ефективності запропонованого методу було проведено моделювання в пакеті Matlab. Низькочастотні складові зображень об'єднували методом усереднення, а високочастотні складові - методом вибору максимального значення.

На рис. 6.12 представлені вхідні дані і результати використання карти інформативності при реєстрації зображень і комплексуванні за допомогою піраміди Лапласа [258].

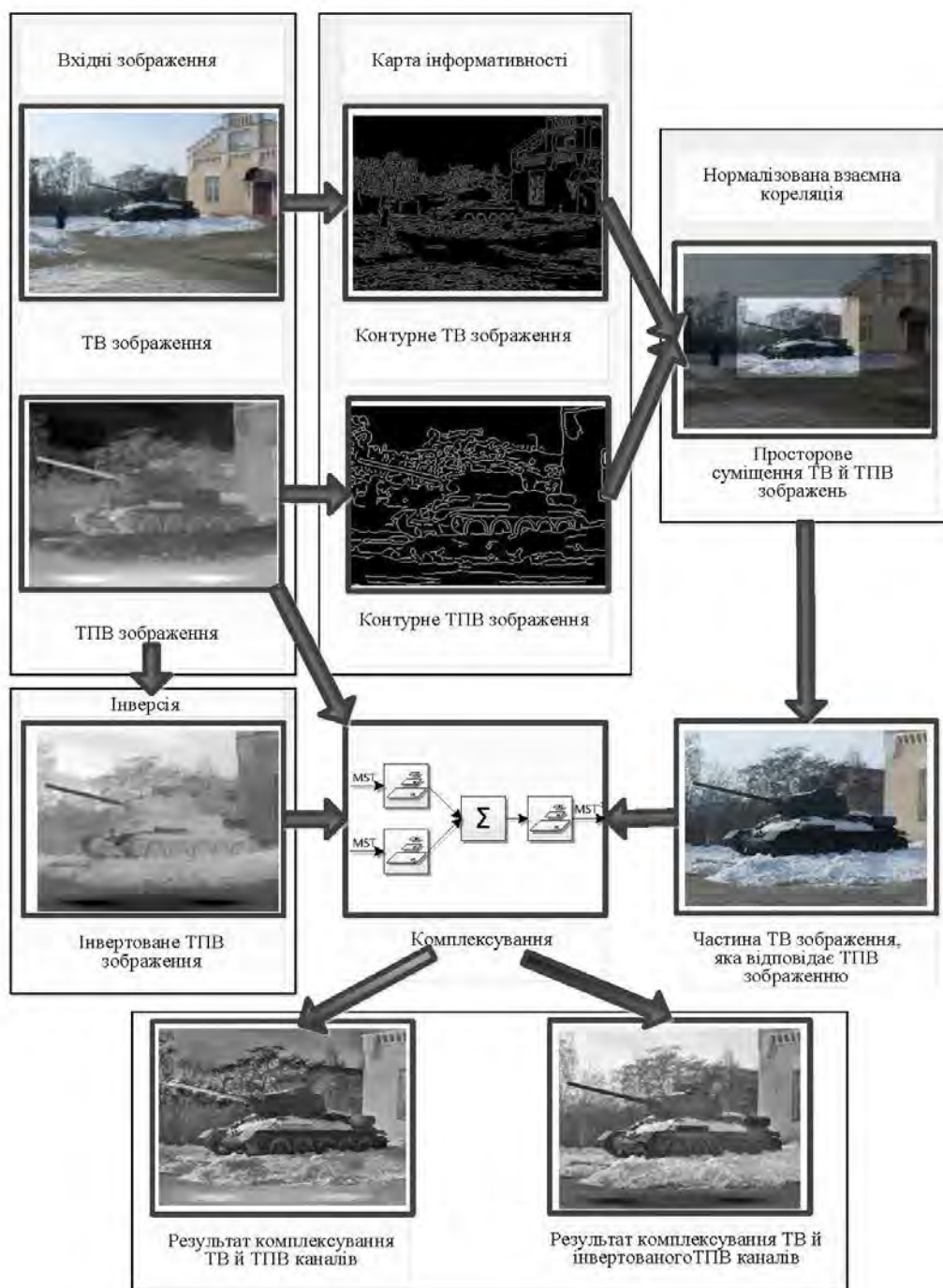


Рис. 6.12. Схема реєстрації та злиття зображень

Видно, що використання карти інформативності дозволяє точно зареєструвати вхідні зображення з двох каналів. Однак результати будуть стійкі тільки за умови, що об'єкт і фон значно відрізняються. За умови подібності об'єкта і фону потрібно використовувати інший показник інформативності. Крім того, рис. 6.12 показує, що за рахунок комплексування підвищується візуальна інформативність результуючого зображення - чітко видно найбільш нагріті ділянки зображення, особливо при використанні інвертованого ТПВ зображення.

В [259] було запропоновано основний канал і відповідне йому базове зображення обирати виходячи із значення показника успішності виконання завдання.

Розроблений метод комплексування в двоканальних ОЕСС здійснюють наступним чином. Отримують вхідні зображення в окремих каналах, наприклад – ТВ і ТПВ. Визначають основний канал, що є більш інформативним, і відповідне йому базове зображення, виходячи із максимального значення показника успішності виконання завдання. На вхідних зображеннях виділяють окремі інформативні області за допомогою будь-якого із відомих методів виділення контурів, формують карту інформативності результуючого зображення, на якій позначають унікальні (ті що не повторюються) та спільні для вхідних зображень області. Знаходять зважену суму для спільних інформативних областей вхідних зображень. Фонова складова переноситься без змін із базового зображення в результуюче. Суть методу пояснюється рис. 6.13, 6.14.



Рис. 6.13. Структурна схема способу комплексуювання в двоканальних ОЕСС

На зображенні ТВ каналу (рис. 6.14) чітко видно людину в автомобілі та номер авто, але повністю відсутня інформація про об'єкти біля автомобіля. На ТПВ зображенні видно людину біля автомобіля, але відсутня інформація про об'єкти в салоні авто. Для побудови загальної карти інформативності ТВ та ТПВ зображень використано метод Кенні для виділення контурів. На кінцевому зображенні показано результат злиття за допомогою піраміди Лапласа.

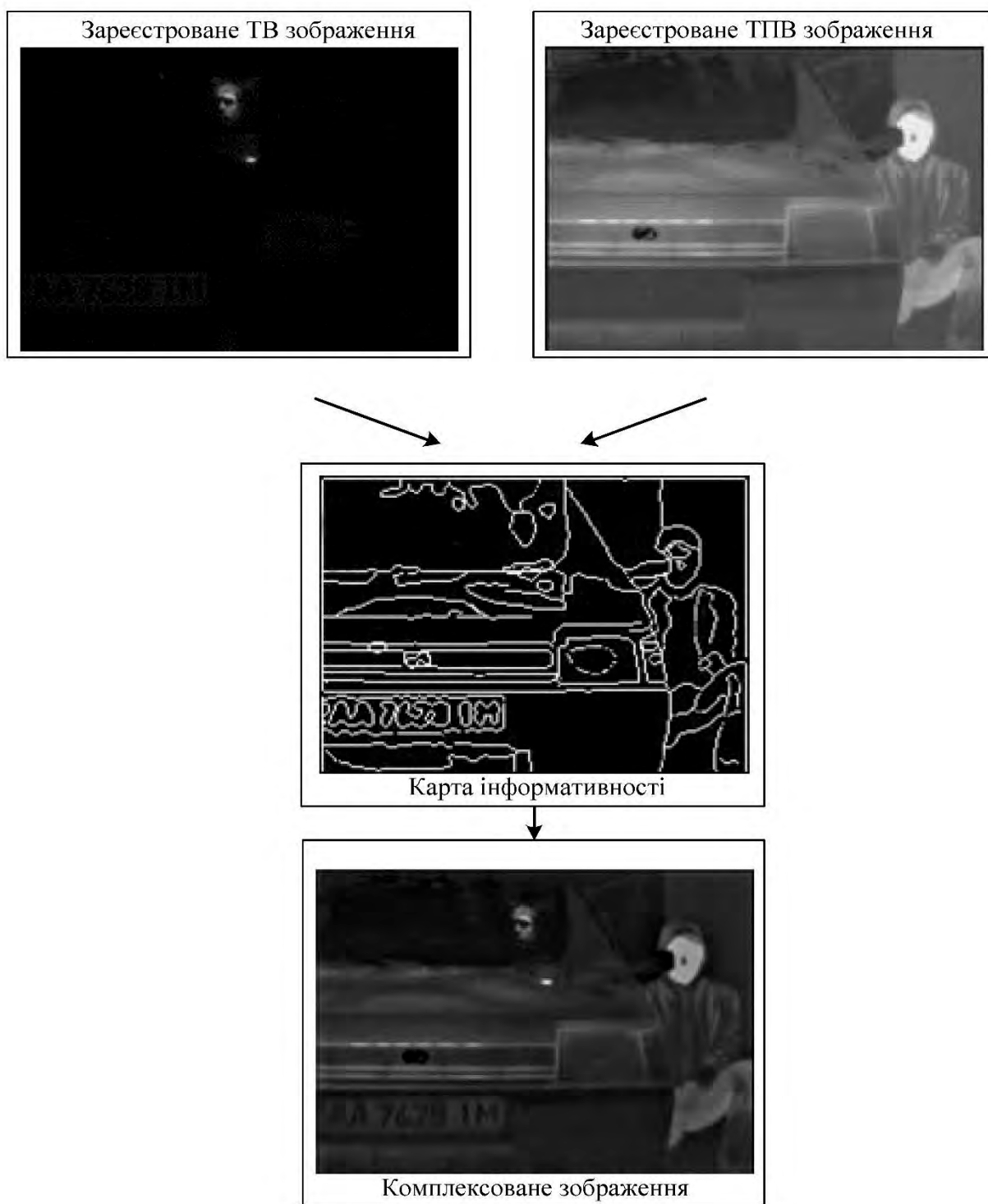


Рис. 6.14. Комплексування з використанням карти інформативності

В даному випадку основним інформаційним каналом був ТПВ канал. На комплексованому зображенні видно людину в автомобілі, людину біля автомобіля, а також номер автомобіля. Замість суцільного непрозорого для ІЧ випромінювання лобового скла автомобіля в ТВ каналі отримали зображення водія в автомобілі, а замість суцільної темряви навколо автомобіля в ТВ каналі отримали зображення

людини справа від авто з ТПВ каналу. Крім того, на комплексованому зображенні чітко видно номер автомобіля з ТВ зображення.

Крім збільшення інформаційного обсягу зображення за рахунок відображення більшої кількості релевантних елементів ФЦО, комплексування забезпечує підвищення просторового розділення в багатоканальних ОЕСС з однаковими спектральними піддіапазонами. Процес обробки відбувається над окремими інформативними областями, що дозволяє зберегти інформацію на високих просторових частотах ТВ зображення, а отже підвищує якість (просторову роздільну здатність) комплексованого зображення. Створення карти інформативності дозволяє збільшити ефективність двоканальних ОЕСС за менших затрат часу.

Оцінимо прискорення комплексування двох зображень з високою та низькою роздільними здатностями, що є актуальним для ОЕСС з різними полями зору. Для цього синхронно з двох ТВ камер були отримані зображення низької (640x480 пікселів, рис. 6.15, а) та високої роздільної здатності (1280x800 пікселів, рис. 6.15, б). Обробка зображень проводилась в середовищі MatLab.



а) зображення низької роздільної здатності

б) зображення високої роздільної здатності

Рис. 6.15. Зображення ТВ каналів

Для прискорення обробки сигналу при достатній деталізованості зображення карта інформативності може формуватись по зображенню низької роздільної здатності (рис. 6.15, а)) [260]. Якщо в ТВ зображенні присутня велика кількість високочастотних складових, то для побудови карти інформативності недоцільно виділяти контури зображень. Краще скористатись іншим швидким алгоритмом,

наприклад, побудованим на основі GBVS (Graph-Based Visual Saliency) [261]. В результаті було виділено інформативні області (рис. 6.16).



Рис. 6.16. Вихідне зображення оригіналу, карти інформативності, вихідного зображення і найбільш «активних» регіонів

Отримана на зображенні низької роздільної здатності інформативна область виділяється на зображенні високої роздільної здатності. В результаті отримується зображення високої роздільної здатності, в якому присутні тільки найбільш інформативні частини поля зору (рис. 6.17).



Рис. 6.17. Виділення інформативних областей на зображенні високої роздільної здатності

Отримане зображення зливається з вхідним зображенням низької роздільної здатності. Результат виконання програми записується в файл “saliency_fusion.jpg” (рис. 6.18)



Рис. 6.18. Вихідне зображення отримане методом комплексування даних з попереднім знаходженням інформативної області




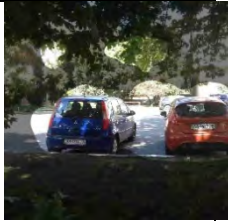




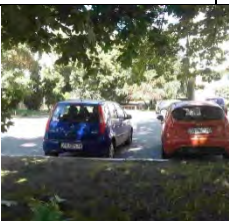
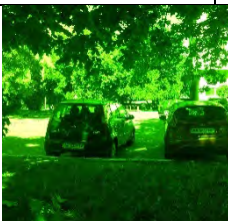
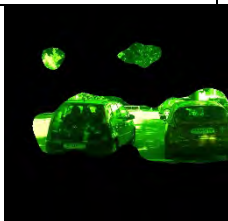
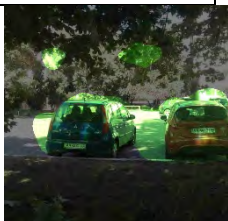

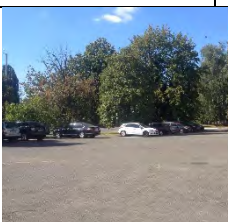
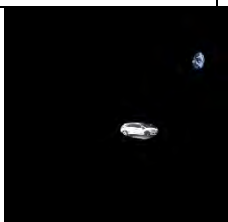
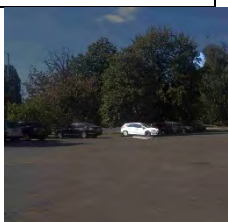
Такий метод обробки вхідних зображень дозволяє пришвидшити роботу ОЕСС, не погіршуючи якості областей інформативного сигналу. При цьому загальна картина ФЦО не втрачається, як було б при звичайному обрізанні знайденої інформативної області.

Суттєве зменшення обсягу даних якісно впливає на швидкість комплексування зображень, отриманих з різних каналів, і подальшої передачі даних на комп'ютер або сервер. Особливо це корисно при потоковій передачі даних через різного роду мережі (Wi-Fi, WAN, LAN тощо).

В таблиці 6.1 наведено розміри отриманих файлів і швидкість виконання роботи програми в середовищі MATLAB 2016, на комп'ютері з характеристиками: процесор - Intel Core 2 Duo T5750 (2,0 ГГц); оперативна пам'ять - 4 ГБ, DDR2, 667 МГц; графічний процесор - NVIDIA GeForce 9500M GS. Така процедура обробки сигналів добре реалізується на спеціалізованих процесорах [262].

Таблиця 6.1

Порівняння розмірів зображень при різних операціях і швидкість їх виконання

№	Перший канал	Другий канал	Знаходження карти інформативності	Комплексування зображень
1				
	107 кБ	460 кБ	85 кБ	117 кБ
	-	-	1,168 с	4,743 с
2				
	4,85 кБ	199 кБ	40 кБ	47 кБ
	-	-	1,107 с	5,915 с
3				
	214 кБ	1,07 МБ	46 кБ	102 кБ
	-	-	2,359 с	7,751 с
4				
	144 кБ	423 кБ	15 кБ	170 кБ
	-	-	2,402 с	3,568 с

В прикладі (1) обсяг даних зображення першого каналу менший на 33% за зображення другого каналу, в прикладі (2) - на 97%, в прикладі (3) - на 90%, в прикладі (4) - на 66%, а це досить вагомо впливає на швидкість виконання операції

пошуку інформативної області. Отримана інформативна область виділяється на зображенні високої роздільної здатності.

Перевага такого підходу знаходження карти інформативності полягає в тому, що обробка проводиться над меншим обсягом даних, ніж якщо б вона виконувалась безпосередньо над зображенням другого каналу. Переконатись в цьому можна оцінивши таймінги наведені в таблиці 6.2 [262].

Таблиця 6.2

Порівняння часу виконання операцій звичайного і запропонованого методу

№	Запропонований метод (сек.)	Виконання операції безпосередньо над зображенням другого каналу (сек.)	Різниця (сек.)
1	1,167	2,374	1,207
2	1,107	1,279	0,172
3	2,359	4,5	2,141
4	2,402	3,113	0,711

В таблиці 6.3 наведені таймінги виконання операції комплексування зображень.

Таблиця 6.3

Порівняння часу комплексування зображень запропонованим методом, та звичайним комплексуванням

№ зображення	Запропонований метод з картою інформативності, с	Розмір зображення, кБ	Виконання комплексування двох зображень безпосередньо, с	Розмір зображення, кБ
1	0,924	109	1,862	420
2	0,274	45	0,524	183,2
3	1,092	102	2,881	1050
4	0,101	95	0,942	423

Швидкість комплексування зображення низької роздільної здатності (рис.

6.15, а)) і отриманого зображення з виділеними інформативними областями (рис. 6.17) є значно більшою, ніж при безпосередньому комплексуванні двох вхідних зображень низької (рис. 6.15, а)) і високої (рис. 6.15, б)) роздільної здатності.

6.3.2 Використання когерентно-оптичного процесора для визначення просторово-частотного спектру ФЦО

Розрахунок показника $ТТР$ (рис. 6.13) передбачає визначення просторово-частотного спектру ФЦО, а також просторово-частотного спектру комплексованого зображення. В наведених вище прикладах спектр визначався чисельно в середовищі MATLAB. Наразі обчислювальні потужності сучасних комп'ютерів є достатніми для таких розрахунків при відносно невеликій кількості інформаційних каналів. Але при збільшенні кількості каналів і необхідності постійного обчислення спектрів в реальному масштабі часу може виникнути потреба підвищення швидкості двовимірного перетворення Фур'є. Таку можливість надає апаратна реалізація цієї функції з використанням когерентно-оптичного процесора (КОП). Доцільно використовувати КОП для отримання спектру комплексованого зображення.

Узагальнена схема КОП містить послідовно розташовані джерело когерентного випромінювання (зазвичай - лазер), освітлювальну оптичну систему, просторово-часовий модулятор світла (ПЧМС), фур'є-об'єктив та МПВ (рис. 6.19) [263].

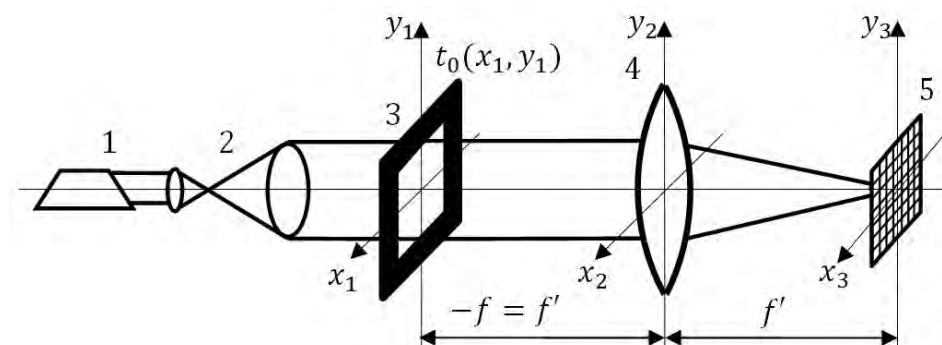


Рис. 6.19. Схема КОП: 1 – лазер; 2 – оптична система, що формувє паралельний пучок променів; 3 – просторово-часовий модулятор світла; 4 – фур'є-об'єктив; 5 – МПВ

Плоска когерентна світлова хвиля від лазера освітлює ПЧМС, де відбувається дифракція світла. Якщо ПЧМС, що має амплітудний коефіцієнт пропускання $t_o(x_1, y_1)$, який відповідає досліджуваному вхідному сигналу, розташовано в передній фокальній площині $x_1 y_1$ фур'є-об'єктива, то розподіл амплітуди поля в його задній фокальній площині $x_3 y_3$, де розташовано МПВ, описується виразом [264, 265]

$$V(x_3, y_3) = C_0 F\{V(x_1, y_1) t_o(x_1, y_1) t_{oa}(x_1, y_1) P_{o,eff}(x_1, y_1)\}, \quad (6.2)$$

де C_0 – комплексний коефіцієнт; $F\{\}$ – оператор двовимірного перетворення Фур'є для просторових частот $v_x = x_3 / \lambda f$, $v_y = y_3 / \lambda f$; λ – довжина хвилі випромінювання лазера; f – фокусна відстань фур'є-об'єктива; $V(x_1, y_1)$ – амплітуда поля на вході модулятора; $t_{oa}(x_1, y_1)$ – апертурна функція, яка обмежує розмір ПЧМС; $P_{o,eff}(x_1, y_1)$ – функція ефективної апертурної діафрагми об'єктива, яка приведена до площини $x_1 y_1$ модулятора; $**$ – оператор двовимірної згортки. Освітленість в площині МПВ дорівнює квадрату амплітуди поля $E(x_3, y_3) = |V(x_3, y_3)|^2$.

Далі МПВ перетворює розподіл освітленості в електричний сигнал, який обробляється за допомогою мікропроцесора з метою визначення параметрів спектру вхідного сигналу.

ПЧМС вводить сигнал до КОП. Його дія описується комплексною функцією амплітудного коефіцієнта пропускання (відбиття) $t_o(x_1, y_1)$. При цьому

$$V'(x_1, y_1) = t_o(x_1, y_1) V(x_1, y_1) = t_s(x_1, y_1) t_m(x_1, y_1) V(x_1, y_1), \quad (6.3)$$

де $V(x_1, y_1)$ і $V'(x_1, y_1)$ – розподіл амплітуди світлового поля до і після модулятора відповідно; $t_s(x_1, y_1)$ – функція, яка характеризує досліджуваний сигнал; $t_m(x_1, y_1)$ – амплітудний коефіцієнт пропускання ПЧМС.

Наразі широкого застосування набули ПЧМС у вигляді рідинно-кристалічних просторових світла модуляторів, які працюють на пропускання. Амплітудний коефіцієнт пропускання таких модуляторів прямокутної форми описується дискретною функцією [266]

$$t_m(x_1, y_1) = \left\{ \left[\text{rect}\left(\frac{x_1}{v_m}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{w_m}\right) \right] ** \left[\frac{1}{V_m W_m} \text{comb}\left(\frac{x_1}{V_m}\right) \text{comb}\left(\frac{y_1}{W_m}\right) \right] \right\} \times \\ \times \left\{ \text{rect}\left(\frac{x_1}{p_m V_m}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{q_m W_m}\right) \right\}, \quad (6.4)$$

де $**$ – оператор двовимірної згортки; $V_m \times W_m$ – період матричною структури модулятора;

$$\text{comb}\left(\frac{x_1}{V_m}\right) \text{comb}\left(\frac{y_1}{W_m}\right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(\frac{x_1}{V_m} - n\right) \delta\left(\frac{y_1}{W_m} - m\right); \quad (6.5)$$

$$\text{rect}\left(\frac{x_1}{p_m V_m}\right) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \left| \frac{x_1}{p_m V_m} \right| \leq \frac{1}{2}; \\ 0 & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (6.6)$$

У формулі (6.4) вираз у перших фігурних дужках визначає імпульсний відгук нескінченної матриці, а вираз у других фігурних дужках обмежує її розміри до величини $p_m V_m \times q_m W_m$.

Фур'є-об'єктиви мають забезпечувати високу якість зображень. Для моделювання фур'є-об'єктива будемо використовувати такі характеристики, як фокусна відстань f , діаметр вхідної зіниці D_o , лінійне поле зору R_o , радіус кружка розсіювання r_o , модуляційна передавальна функція $M_o(v_x, v_y)$.

В якості реєстратора розподілу спектра сигналу в КОП використовуються МПВ видимого діапазону спектру. Для їх моделювання будемо використовувати такі характеристики, як формат матриці $p_D \times q_D$, розмір пікселя $v_D \times w_D$, період матричної структури приймача $V_D \times W_D$, чутливість на довжині хвилі випромінювання лазера R_D , частота кадрів f_f , тактова частота зчитування f_d , порогова експозиція H_n , час накопичення (інтегрування) t_i .

Матрична структура ПЧМС й МПВ суттєво впливає на просторовий спектр сигналу КОП [267]. Процес просторової вибірки, яку здійснює МПВ, по аналогії з (2.91) описується згортокою

$$R_D(x_3, y_3) = \left\{ R_{D00}(x_3, y_3) ** \left[\frac{1}{V_D W_D} \text{comb} \left(\frac{x_3}{V_D} \right) \text{comb} \left(\frac{y_3}{W_D} \right) \right] \right\} \times \\ \times \left\{ \text{rect} \left(\frac{x_3}{p_D V_D} \right) \text{rect} \left(\frac{y_3}{p_D W_D} \right) \right\}, \quad (6.7)$$

де $R_{D00}(x_3, y_3)$ – чутливість або імпульсний відгук центрального пікселя.

Чутливість центрального пікселя визначається як

$$R_{D00}(x_3, y_3) = \begin{cases} R_D, & \text{якщо } -\frac{v_D}{2} \leq x_3 \leq \frac{v_D}{2}; -\frac{w_D}{2} \leq y_3 \leq \frac{w_D}{2} \\ 0 & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (6.8)$$

Оптична система КОП є лінійною інваріантною когерентною системою з імпульсним відгуком $h_{sa,c}(v_x, v_y)$, який для запропонованої фізико-математичної моделі має вигляд

$$h_{sa,c}(v_x, v_y) = C_0 F \{ V(x_1, y_1) t_m(x_1, y_1) t_{oa}(x_1, y_1) P_{o,eff}(x_1, y_1) \}. \quad (6.9)$$

Ефективність КОП можна характеризувати когерентною передавальною функцією спектроаналізатора $K_{sa}(x_1, y_1)$, яка визначається як нормоване перетворення Фур'є імпульсного відгуку системи $h_{sa,c}(v_x, v_y)$, тобто

$$K_{sa}(x_1, y_1) = \frac{F \{ h_{sa,c}(v_x, v_y) \}}{K_{sa}(0, 0)}. \quad (6.10)$$

Після підстановки імпульсного відгуку (6.9) до нормованого перетворення Фур'є (6.10) отримаємо

$$K_{sa}(x_1, y_1) = V(x_1, y_1) t_m(x_1, y_1) t_{oa}(x_1, y_1) P_{o,eff}(x_1, y_1) \quad (6.11)$$

Аналіз функції (6.11) свідчить про те, що когерентна передавальна функція оптичної системи спектроаналізатора дорівнює одиниці в межах пікселів ПЧМС і дорівнює нулю в інших випадках. Піксельна структура пропускання ПЧМС призводить до спотворення форми досліджуваного спектру, що обумовлено просторовою дискретизацією вхідного сигналу. Це необхідно враховувати при виборі просторової розмірності ПЧМС при відомих геометричних параметрах ТВ та ТПВ МПВ.

Взявши до уваги те, що в даному випадку просторовий спектр не буде

відновлюватись, а використовується тільки для розрахунку показника якості, а також те, що в ТПВ каналі просторовий спектр є досить обмеженим, можна очікувати, що в багатоканальних ОЕСС з комплексуванням використання КОП буде виправданим і суттєво скоротить час обробки сигналу.

6.4 Послідовне комплексування при вібраціях і зсувах

Під час реєстрації зображення в каналах ОЕСС відбувається природна втрата просторового розділення внаслідок [268]:

- оптичних спотворень (розфокусування, дифракційних обмежень, аберацій);
- дискретизації зображення ПВ;
- руху платформи, вібрацій;
- шуму, який виникає в електронному тракті або в процесі передачі інформації.

В разі авіакосмічних спостережень зображення спотворені ще й атмосферою внаслідок турбулентності та наявності на трасі спостереження аерозолів. Експериментально доведено [43], що найбільші спотворення зображення викликає рух платформи та вібрації. На практиці вібрації можна мінімізувати, але повністю усунути – неможливо. Тому важливою проблемою є отримання зображень високого розділення в умовах вібрацій.

На даний момент вищезгадану проблему долають шляхом вирішення двох окремих задач:

- відновлення зображень, спотворених вібраціями [43];
- підвищення просторової роздільної здатності зображень за рахунок методів суперрозділення [269, 44].

Але для цього необхідною є наявність апріорної інформації про умови зйомки, ускладнення конструкції за рахунок використання додаткових механічних елементів, необхідність великої кількості ітерацій при обрахунках. Інтерес викликає об'єднання вищезгаданих підходів, а саме – відновлення зображень, спотворених вібраціями, з одночасним підвищенням просторового розділення [270, 271]. Розглянемо низькочастотні вібрації (рис. 6.20), оскільки вони викликають

найбільші спотворення зображення. Із рисунка видно, що на певних інтервалах синусоїдальна вібраційна крива має лінійний характер і при певних умовах її можна повністю апроксимувати лінійними функціями. З урахуванням цього розглянемо підвищення роздільної здатності зображень, спотворених лінійним рівномірним рухом.

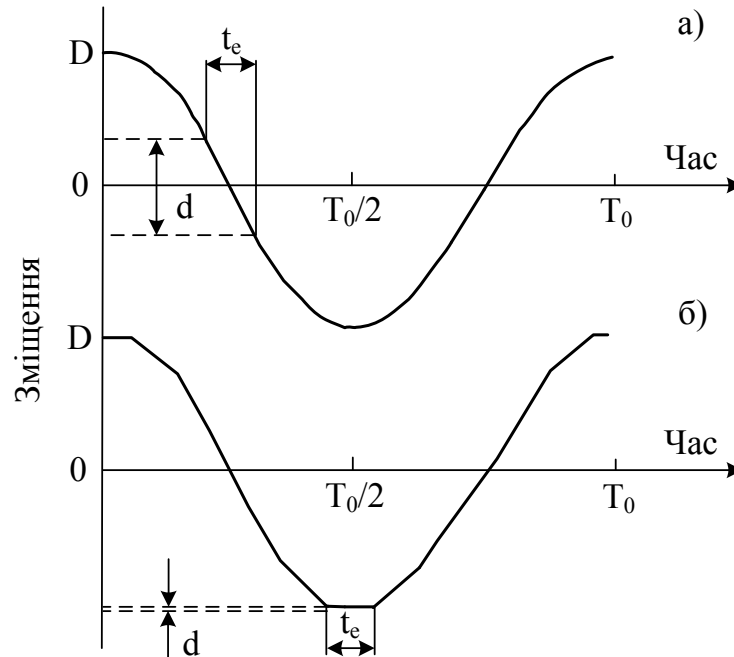


Рис. 6.20. Низькочастотна вібрація: T_0 – період вібрації; D – амплітуда вібрації; t_e – час експозиції; d – радіус плями змазу

Був розроблений метод неконтрольованого мікросканування [272]. Даний метод є аналогічним методу в [51], багато в чому схожий на традиційне мікросканування [269], але має й свої особливості.

Всі розрахунки та моделювання реалізовані за допомогою програми MATLAB.

Реалізація методу неконтрольованого мікросканування включає дві стадії: реєстрацію та відновлення. На стадії реєстрації визначається величина зсуву між зображеннями низької роздільної здатності з точністю до долей пікселя. Стадія відновлення включає два етапи:

- власне відновлення (компенсація зміщення між зображеннями на ціле число пікселів);

- підвищення роздільної здатності (за рахунок субпіксельних зміщень між зображеннями).

Зазвичай використовують кілька способів реєстрації зображень: кореляційний, градієнтний, частотний, фазовий. Проте найбільш стійким при наявності шумів та накладенні спектрів є метод нормалізованої взаємної кореляції, саме його будемо використовувати для розрахунків. Суть даного методу полягає в наступному: одне із зображень розбивається на так звані блоки пошуку розміром $m \times n$ ($m = n = 16$ пікселів виходячи із компромісу «точність – обчислювальна складність»). Інше зображення «сканується» по черзі кожним з цих блоків в межах області пошуку до знаходження максимуму відповідності (зміщені блоки). Потім встановлюється величина та напрямок зміщення між центрами блоку пошуку та зміщеного блоку. Так повторюється для кожної пари «блок пошуку – відповідний блок зміщення». В результаті отримуємо векторне поле зміщень кожного блоку в зображенні [272].

Слід зазначити, що крім графічного зображення векторного поля зміщень, отримуємо також числові значення величини та напрямку зміщення кожного блоку зображення в робочій області програми MATLAB.

Визначивши величину і напрямок змазу, знаходимо МПФ лінійного руху

$$\tau(f_x) = \begin{cases} |\sin c(\pi f_x d)|, & f_x \leq d^{-1} \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}, \quad (6.12)$$

де d – ширина плями змазу.

Знаючи модуляційну передавальну функцію лінійного руху, що спотворює зображення, відновлюємо його в програмі MATLAB за допомогою фільтра Вінера:

$$M(f_x) = \frac{1}{\tau(f_x)} \cdot \frac{|\tau(f_x)|^2}{|\tau(f_x)|^2 + \mu}, \quad (6.13)$$

де μ – відношення сигнал/шум. Аналогічні формули можна отримати для другої координати.

Для підвищення просторової роздільної здатності використовуємо алгоритм, закладений в класичному мікроскануванні, який зображено на рис. 6.21.

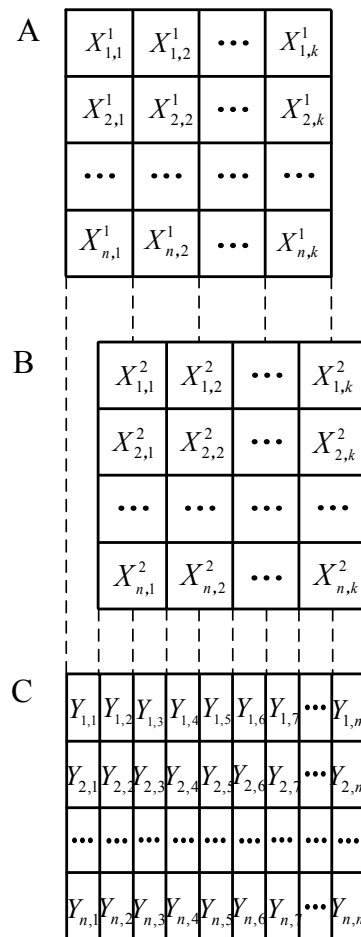


Рис. 6.21. Алгоритм мікросканування

На даному рисунку зображення подані в матричному вигляді: A – зображення із зниженою дискретизацією розміром $n \times k$, B – зображення із зниженою дискретизацією, зміщене відносно A на 0,5 пікселя в горизонтальному напрямку, розміром $n \times k$, C – зображення з підвищеною роздільною здатністю розміром $n \times m$, де $m = 2k + 1$. Яскравість кожного пікселя нового зображення обчислюється за формулами

$$Y_{k,\text{парне}} = \sum_{i=1}^{k/2} 2 \cdot X^1_{k/2+1-i} - 2 \cdot X^2_{k/2+1-(i+1)} - X^1_1, \quad (6.14)$$

$$Y_{k,\text{непарне}} = \sum_{i=1}^{(k-1)/2} 2 \cdot X^2_{(k-1)/2+1-i} - 2 \cdot X^1_{(k-1)/2+1-i} + X^1_1, \quad (6.15)$$

де X^1 – відліки яскравості першого зображення; X^2 – відліки яскравості другого зображення; Y_k – відліки яскравості зображення з підвищеною роздільною здатністю; множник 2 виконує функцію нормування, щоб величина енергії, яка приходить на приймач випромінювання, дорівнювала величині енергії

результуючого зображення.

Як показано на рисунку, після обробки отримуємо зображення з підвищеною роздільною здатністю. При цьому покращення роздільної здатності відбувається лише в горизонтальному напрямку. Тобто, маючи два зображення із субпіксельним зміщенням на основі різницевої відмінності, отримуємо нове зображення з підвищеною частотою дискретизації вздовж напрямку руху.

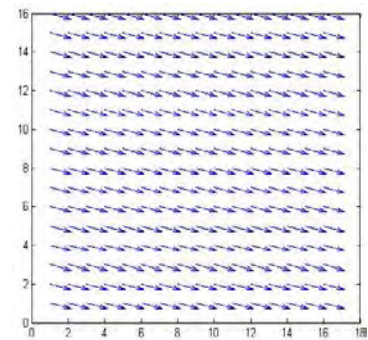
Згідно вибраного методу в середовищі Matlab було написано програму для розрахунку величини та напрямку зміщення між двома зображеннями (програма працює із зображеннями розміром 256×256 пікселів). Розроблена програма була використана для визначення величини та напрямку зміщення між зображеннями, отриманими ТВ камерою (рис. 6.22, а) - в)).



а)



б)



в)

Рис 6.22. Результати визначення змазу: а) оригінальне зображення; б) зображення, зміщене на 4,12 пікселів в напрямку $345,9^\circ$; в) векторне поле зміщення

Результати відновлення змазаних зображень (оригінальне зображення - рис. 6.23) за допомогою фільтра Вінера представлені на та на рис.6.24, а) -ж).



Рис. 6.23. Оригінальне зображення

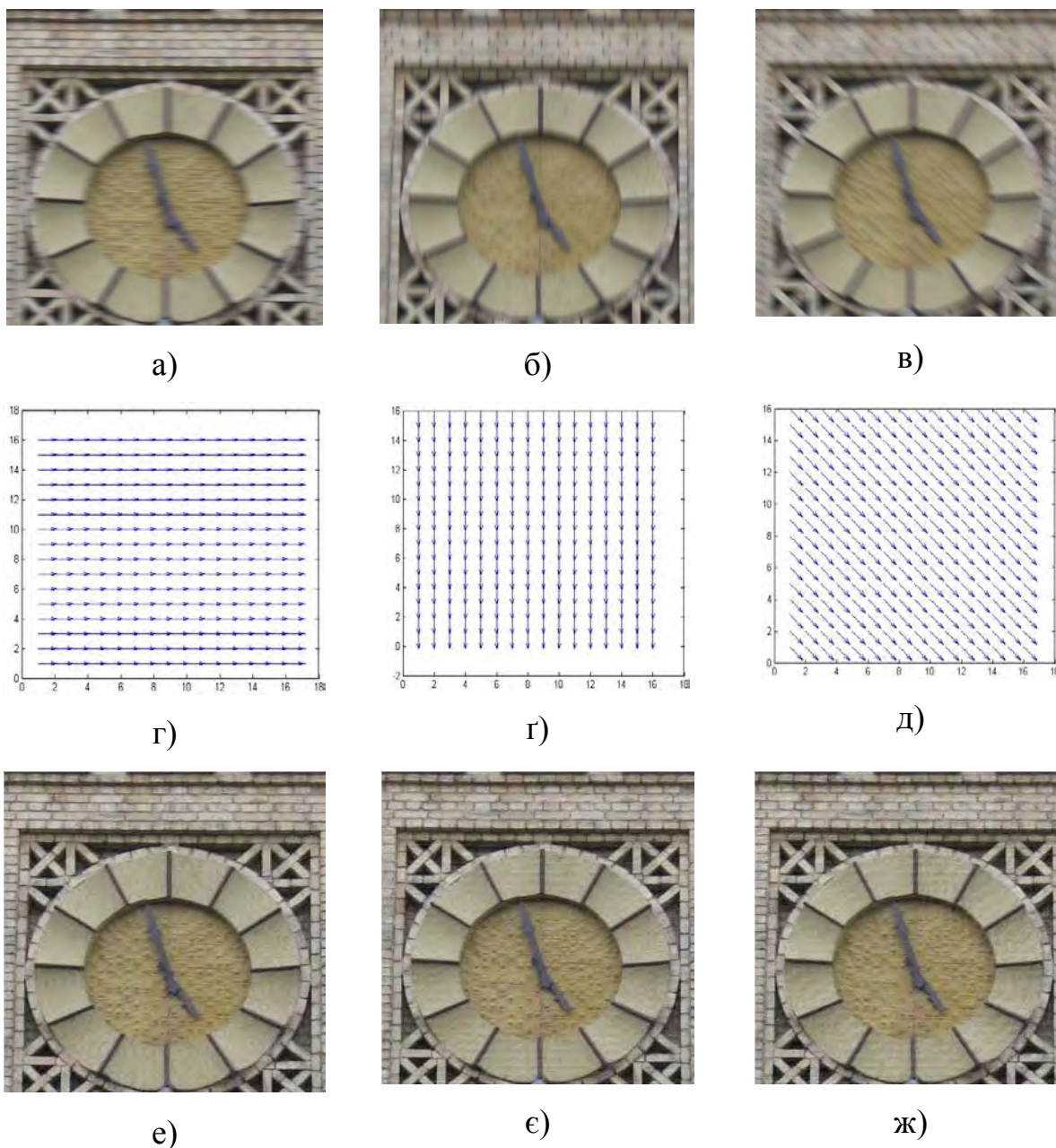


Рис. 6.24. Результати визначення змазу та відновлення зображень: а) - в) зміщене зображення (а) на 7 пікселів в напрямку 0° ; б) на 7 пікселів в напрямку 270° ; в) на 7 пікселів в напрямку 0° і на 7 пікселів в напрямку 270° (9,9 пікселів в напрямку 315°); г) - д) векторне поле зміщення; е) - ж) відновлене зображення

На рис. 6.25 представлені результати відновлення з одночасним підвищенням просторового розділення.

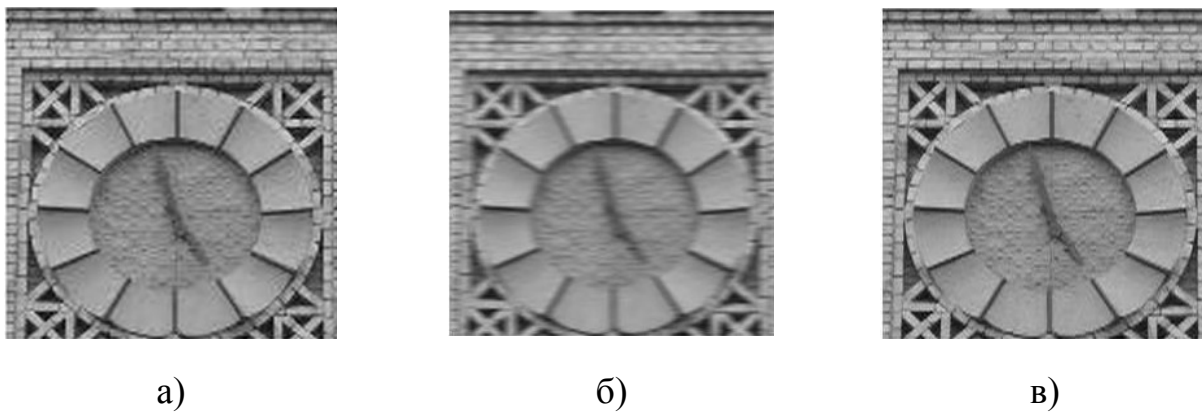


Рис. 6.25. Відновлення зображень з одночасним підвищенням просторового розділення: а) зображення з пониженою дискретизацією; б) зображення, зміщене на 7,5 пікселя в напрямку 0° ; в) відновлене зображення

Для наочності на рис. 6.26 показано результати відновлення зображень за допомогою фільтра Вінера, та відновлення з одночасним підвищенням просторового розділення.

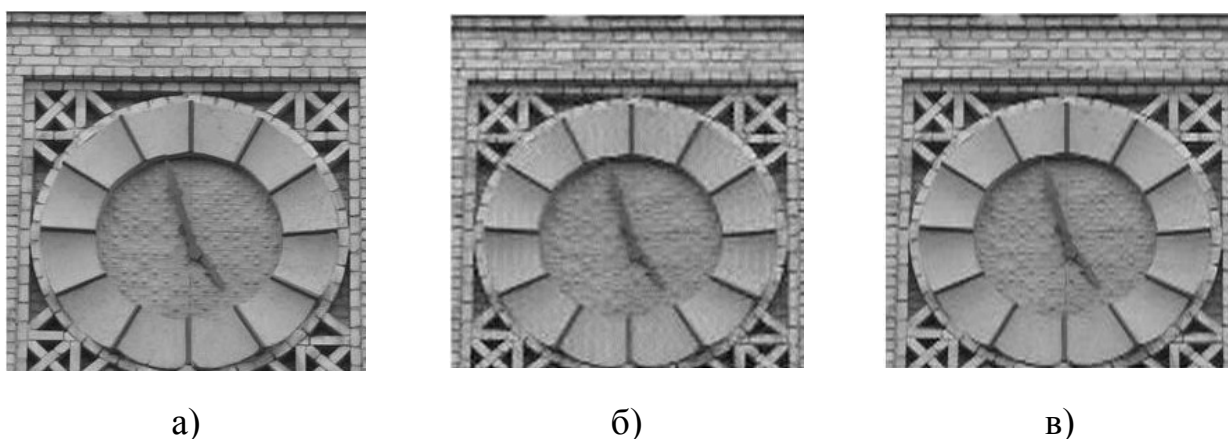


Рис. 6.26. Порівняння результатів: а) оригінальне зображення; б) зображення відновлене за допомогою фільтра Вінера; в) відновлене зображення з підвищеною роздільною здатністю

Очевидною є краща візуальна якість зображення, отриманого з використанням алгоритмів підвищення просторового розділення неконтрольованим мікроскануванням.

6.5 Новий метод комплексування

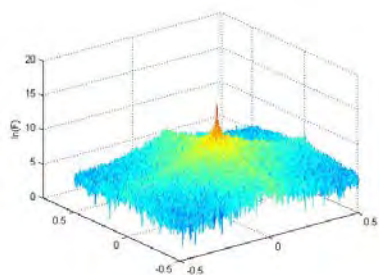
Поєднання послідовного комплексування інформації в окремих каналах в процесі реєстрації для усунення змазування зображення (рис. 6.27) з наступним паралельним злиттям зображень різних інформаційних каналів (рис. 6.14) дає можливість помітно покращити якість вихідного зображення. Зважаючи на гіршу просторову роздільну здатність ТПВ каналів, послідовне комплексування доцільно використовувати саме в цих каналах. Якщо основним інформаційним каналом є ТПВ, то використання карти інформативності при паралельному комплексуванні дозволяє не тільки підвищити якість кінцевого зображення, але й зменшити час оброблення сигналу.

Результати показують, що запропоновані методи реєстрації та комплексування дозволяють точно реєструвати вхідні зображення та поєднувати найбільш інформативні області кожного з них з більшою ефективністю, ніж в аналогах.

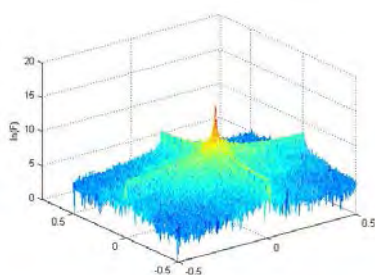
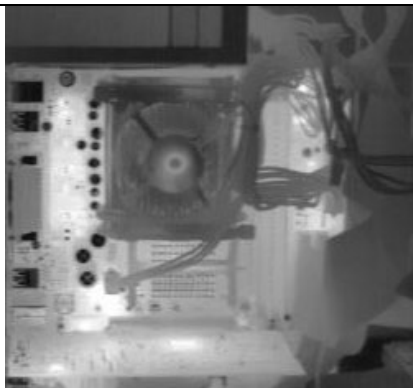
Згідно до обраної стратегії комплексування алгоритм злиття зображень має адаптивно змінюватись відповідно до зміни поточних умов спостереження.

Оцінимо ефективність комплексування інформації за наявності задимленості в лабораторних умовах в двоканальній ОЕСС при застосуванні найбільш розповсюджених на сьогоднішній день методів, таких як: метод усереднення, метод головних компонент, піраміда Лапласа, градієнтна піраміда, морфологічна піраміда, контрастна піраміда, вейвлет перетворення, інваріантне до зсувів вейвлет перетворення, а також розробленого методу [42, 259].

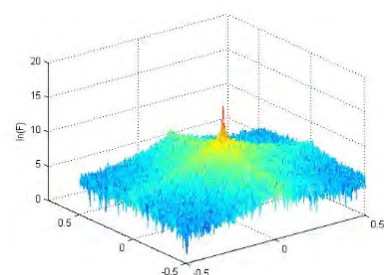
Вхідні ТВ й ТПВ зображення, а також їх нормовані двовимірні просторові спектри показані на рис. 6.27 (відповідно - а) і б)).



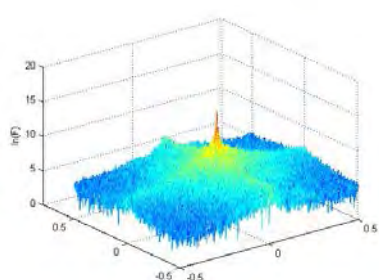
а) вхідне ТВ зображення



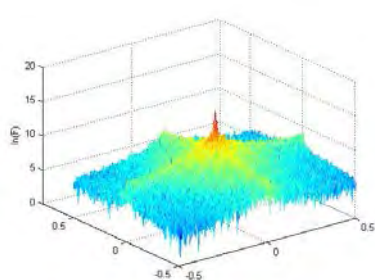
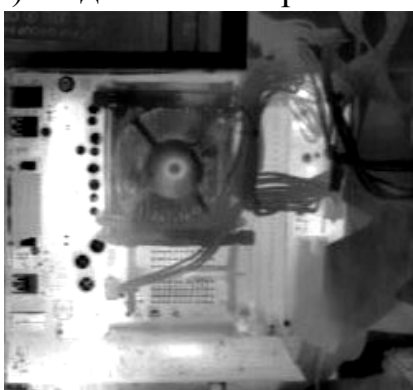
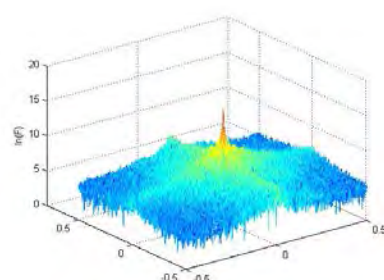
б) вхідне ТПВ зображення



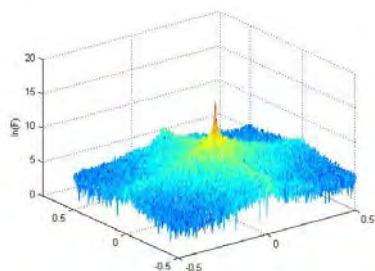
в) піраміда ФВП



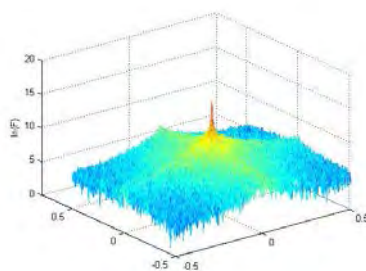
г) метод усереднення

д) метод головних
компонент

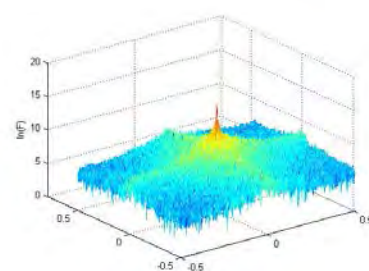
е) піраміда Лапласа



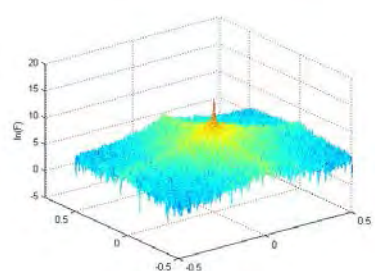
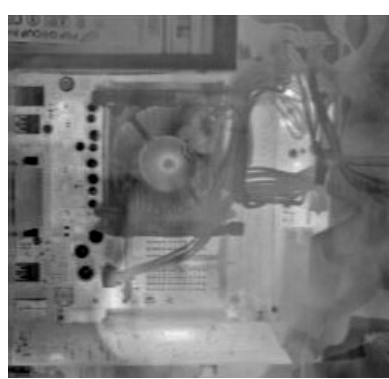
ж) контрастна
піраміда



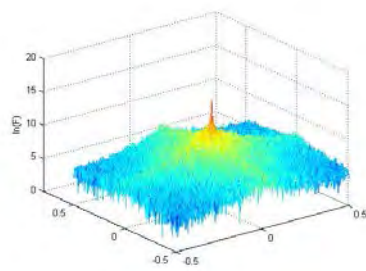
з) градієнтна піраміда



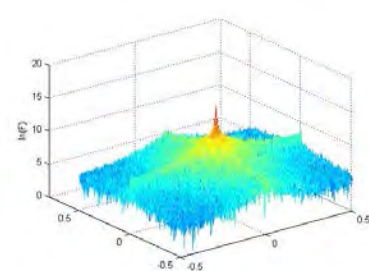
і) морфологічна піраміда



к) вейвлет перетворення



л) інваріантне до зсувів
вейвлет перетворення



м) запропонований метод

Рис. 6.27. Вхідні зображення та результати комплексуювання

Розрахуємо спочатку показник успішності виконання завдання для ТВ та ТПВ каналів. Для цього визначаємо діапазон частот, що передається ТВ та ТПВ каналами, тобто діапазон частот, в межах якого контраст об'єкта перевищує ФПК

системи. В результаті інтегрування сигналів зображень згідно формул (3.104) та (3.105) маємо, що ТВ канал передає сигнал в діапазоні частот $(0 - 4)$ мрад⁻¹, ТПВ канал передає сигнал в діапазоні частот $(0 - 7)$ мрад⁻¹. Така нетипова ситуація вочевидь обумовлена тим, що ТВ зображення суттєво маскується димом.

Діапазон частот, що передає ТПВ канал більший за діапазон частот, що передає ТВ канал. Тому спочатку визначаємо спільний для обох каналів діапазон частот – від 0 мрад⁻¹ до 4 мрад⁻¹.

Для оцінки методу усереднення та методу головних компонент – методів без перетворення масштабу, визначаємо показник успішності виконання завдання в діапазоні частот, що передаються:

$$TTPH_{\text{ТПВ}} = (f_{\text{tgtincx}}) \cdot \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\tau_{\text{beers}}(R_r) \cdot C_{\text{tgt}}}{CTFH_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 21,3 \quad \text{– горизонтальна складова показника}$$

успішності виконання завдання ТПВ каналу (для спільного діапазону частот з ТВ каналом);

$$TTPV_{\text{ТВ}} = (f_{\text{tgtincy}}) \cdot \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\tau_{\text{beers}}(R_r) \cdot C_{\text{tgt}}}{CTFV_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 44 \quad \text{– вертикальна складова показника}$$

успішності виконання завдання ТПВ каналу (для спільного діапазону частот з ТВ каналом);

$$TTP_{\text{ТПВ}} = \sqrt{TTPH_{\text{ТПВ}} \cdot TTPV_{\text{ТПВ}}} = 30,6 \quad \text{– показник успішності виконання завдання ТПВ}$$

каналу (для спільного діапазону частот з ТВ каналом);

$$TTPH_{\text{ТВ}} = (f_{\text{tgtincx}}) \cdot \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\tau_{\text{beers}}(R_r) \cdot C_{\text{tgt}}}{CTFH_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 5 \quad \text{– горизонтальна складова показника}$$

успішності виконання завдання ТВ каналу;

$$TTPV_{\text{ТВ}} = (f_{\text{tgtincy}}) \cdot \sum_{i=0}^4 \left(\frac{\tau_{\text{beers}}(R_r) \cdot C_{\text{tgt}}}{CTFV_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 7,8 \quad \text{– вертикальна складова показника}$$

успішності виконання завдання ТВ каналу;

$TTP_{TB} = \sqrt{TTPH_{TB} \cdot TTPV_{TB}} = 6,2$ – показник успішності виконання завдання ТВ каналу;

ТПВ канал має також додаткову інформацію в діапазоні частот від 4 мрад⁻¹ до 7 мрад⁻¹.

$$TTPH_{ТПВ} = (f_{tgtincx}) \cdot \sum_{i=4}^7 \left(\frac{\tau_{beers}(R_r) \cdot C_{tgt}}{CTFH_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 17,5$$
 – горизонтальна складова показника

успішності виконання завдання ТПВ каналу (додаткова інформація);

$$TTPV_{ТПВ} = (f_{tgtincy}) \cdot \sum_{i=4}^7 \left(\frac{\tau_{beers}(R_r) \cdot C_{tgt}}{CTFV_i} \right)^{\frac{1}{2}} = 24,5$$
 – вертикальна складова показника

успішності виконання завдання ТПВ каналу (додаткова інформація);

$$TTP_{ТПВ} = \sqrt{TTPH_{ТПВ} \cdot TTPV_{ТПВ}} = 20,7$$
 – показник успішності виконання завдання ТПВ каналу (додаткова інформація).

Для методів з перетворенням масштабу діапазон частот (0 – 4) мрад⁻¹ розбиваємо на октави. При 4-хрівневому розкладі для даних методів комплексовання октав також буде чотири.

В табл. 6.4 наведені значення показника успішності виконання завдання ТВ та ТПВ каналів для 4-х октав.

Таблиця 6.4

Показник успішності виконання завдання ТВ та ТПВ каналів для 4-х октав

Канали	Октави			
	L_1	L_2	L_3	L_4
ТВ	6,2	4,9	3,6	2,1
ТПВ	30,6	24,5	17,96	11

За допомогою пакету Matlab знаходимо кореляцію Пірсона між комплексованим і ТВ зображеннями, а також між комплексованим і ТПВ зображеннями в кожній октаві за формулою (3.111). Результати наведені в табл. 6.5, 6.6.

Таблиця 6.5

Кореляція Пірсона між комплексованим зображенням і ТВ для 4-х октав

Метод комплексування	Октави			
	L_1	L_2	L_3	L_4
Метод усереднення	0,52	—	—	—
Метод головних компонент	0,38	—	—	—
Піраміда Лапласа	0,42	0,33	0,24	0,14
Гradientна піраміда	0,47	0,37	0,27	0,16
Піраміда ФВП	0,46	0,36	0,27	0,16
Морфологічна піраміда	0,45	0,36	0,26	0,15
Контрастна піраміда	0,54	0,41	0,3	0,18
Вейвлет перетворення	0,49	0,39	0,29	0,17
Інваріантне до зсувів вейвлет перетворення	0,48	0,38	0,28	0,16
Запропонований метод	0,32	0,09	0,07	0,04

Таблиця 6.6

Кореляція Пірсона між комплексованим зображенням і ТПВ для 4-х октав

Метод комплексування	Октави			
	L_1	L_2	L_3	L_4
Метод усереднення	0,67	—	—	—
Метод головних компонент	0,92	—	—	—
Піраміда Лапласа	0,78	0,63	0,46	0,28
Гradientна піраміда	0,76	0,61	0,45	0,27
Піраміда ФВП	0,75	0,6	0,44	0,27
Морфологічна піраміда	0,69	0,55	0,41	0,25
Контрастна піраміда	0,74	0,54	0,39	0,24
Вейвлет перетворення	0,76	0,61	0,45	0,27
Інваріантне до зсувів вейвлет перетворення	0,77	0,62	0,45	0,28
Запропонований метод	0,94	0,75	0,55	0,34

За допомогою пакету Matlab знаходимо кореляцію Пірсона між вхідними зображеннями (табл. 6.7).

Таблиця 6.7

Кореляція Пірсона між ТВ та ТПВ зображеннями для 4-х октав

Кореляція	Октави			
	L_1	L_2	L_3	L_4
ТВ і ТПВ	0,17	0,14	0,1	0,06

Визначаємо показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням за формулою (3.110). Результати розрахунків представлено в табл. 6.8.

Таблиця 6.8

Показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням (TTP_k) при використанні різних методів комплексування

№	Метод комплексування	Значення показника
1	Метод усереднення	30
2	Морфологічна піраміда	30,2
3	Піраміда ФВП	31,8
4	Контрастна піраміда	31,9
5	Градiєнтна піраміда	32,1
6	Вейвлет перетворення	32,2
7	Піраміда Лапласа	32,3
8	Інваріантне зсувів вейвлет перетворення	32,4
9	Метод головних компонент	35,7
10	Запропонований метод	35,9

Враховуючи додаткову інформацію ТПВ каналу в діапазоні частот від 4 мрад⁻¹ до 7 мрад⁻¹, отримаємо значення показника успішності виконання завдання, наведені в табл. 6.9.

Таблиця 6.9

Показник успішності виконання завдання для системи з комплексуванням (TTP_k) при використанні різних методів комплексування

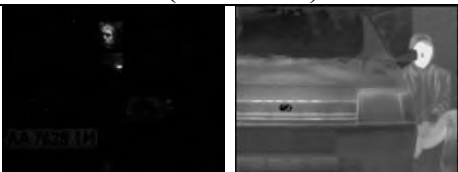

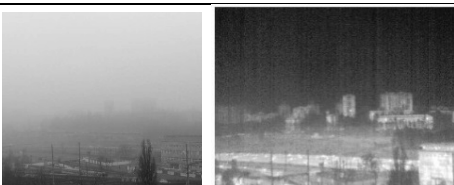
№	Метод комплексування	Значення показника
1	Метод усереднення	50,7
2	Морфологічна піраміда	50,9
3	Піраміда ФВП	52,5
4	Контрастна піраміда	52,6
5	Градiєнтна піраміда	52,8
6	Вейвлет перетворення	52,9
7	Піраміда Лапласа	53
8	Інваріантне зсувів вейвлет перетворення	53,1
9	Метод головних компонент	56,4
10	Запропонований метод	56,6

Згідно з розрахунками найкращі результати серед стандартних методів злиття дає метод головних компонент, що збігається з суб'єктивною експертизою. На базі цього методу у відповідності до стратегії комплексування реалізовано запропонований метод і розраховано його ефективність. Вона трохи перевищує ефективність базового методу.

Виконані в різний час доби й року спостереження з допомогою двоканальної ОЕСС підтвердили, по-перше, різну ефективність одних й тих же методів злиття зображень за різних умов; по-друге, продемонстрували хорошу відповідність між візуальною якістю зображень та їх показником *ТТР*. В таблиці 6.10 наведені найкращі методи комплексування для зображень рис. 3.6, рис. 6.5, рис.6.7, рис. 6.27.

Таблиця 6.10

Порівняння методів комплексування

№	Зареєстровані зображення (ТВ/ТПВ)	Умови спостереження	Метод злиття
1.		Ніч, відстань 5 м	Піраміда Лапласа
2.		День, хмарна погода, відстань 50 м – 120 м	Метод головних компонент
3.		День, туман, відстань 200 м – 950 м	Інваріантне до зсуву вейвлет- перетворення
4.		Лабораторні умови, відстань 1 м	Метод головних компонент

Суб'єктивна експертиза виконувалась в однакових лабораторних умовах 16 операторами на протязі двох сеансів (по 8 операторів за сеанс). Дистанція

спостереження та середня яскравість екрану рідкокристалічного монітору обиралась кожним оператором індивідуально й не змінювалась на протязі аналізу зображень. Час спостережень не обмежувався. Методи злиття зображень рейтингувались по величині загальної візуальної якості.

Цікаво, що при зміні зорової задачі суб'єктивна якість методів злиття також може змінюватись. Наприклад, при оцінці наявності теплових аномалій в парах зображень №2 і №4 кращий результат дали прості методи без розкладу зображень на основі виділення максимумів. Спостерігачі також в більшості стверджували, що вихідне ТПВ зображення №4 є найбільш інформативним при аналізі теплового стану в середині комп'ютера. Експериментальні дослідження показали, що в польових умовах найкращі результати дають інваріантне до зсуву вейвлет-перетворення та піраміда Лапласа.

Для зображень (рис. 6.28 [42]), отриманих в польових умовах з допомогою макету, зображеного на рис. 6.3, визначались не тільки узагальнені показники якості комплексування, але і ймовірнісні характеристики виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта .



а) зображення в ТВ каналі



б) зображення в ТПВ каналі

Рис. 6.28. Зареєстровані в польових умовах зображення

Результати комплексування показані на рис. 6.29, а) - і) та в табл. 6.11.



а) метод усереднення



б) метод головних компонент



в) піраміда Лапласа



г) контрастна піраміда



д) градієнтна піраміда



е) морфологічна піраміда



ж) вейвлет перетворення



з) інваріантне до зсувів вейвлет перетворення



і) запропонований метод

Рис. 6.29. Результати комплексування

Ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта двокальною ОЕСС розраховуються за формулою (3.108)

$$P_{\kappa}(R) = \frac{\left(\frac{V_{\kappa}(R)}{V_{50}(3)} \right)^E}{1 + \left(\frac{V_{\kappa}(R)}{V_{50}(3)} \right)^E},$$

де $V_{\kappa} = \frac{\sqrt{A_0 TTP_{\kappa}}}{R}$ для різних відстаней спостереження.

По реальним зображенням в середовищі Matlab отримуємо показник успішності виконання завдання: для ТПВ каналу без комплексування – 4,33; для

ОЕСС з комплексуванням запропонованим методом – 4,98. Тобто за рахунок комплексування значення показника збільшилось в 1,15 раз.

Таблиця 6.11

Оцінка результатів комплексування по рис. 6.29

Метод комплексування	Стандартне відхилення	Інформаційний показник	$Q^{AB/F}$	Анізотропія	TTP_{κ}	Суб'єктивна оцінка
Метод усереднення	39,6317	2,8185	0,3254	0,0023	25	3
Метод головних компонент	49,6429	3,3522	0,5839	0,0033	23	2
Піраміда Лапласа	54,5903	2,7926	0,5788	0,0068	29	4
Контрастна піраміда	51,7377	2,6041	0,3259	0,0057	28	4
Градiєнтна піраміда	43,3421	2,6923	0,5414	0,0047	26	3
Морфологічна піраміда	57,5509	2,7186	0,5301	0,0089	27,5	4
Вейвлет перетворення	50,3732	2,6116	0,5392	0,0070	28	4
Інваріантне до зсувів вейвлет перетворення	50,7794	2,7281	0,5779	0,0066	30	4
Запропонований метод	57,4060	3,8997	0,6183	0,0052	31,5	5

Число штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50 % ймовірності правильного виявлення, V_{50} дорівнює 2,7 [9].

Після підстановки вхідних даних функція ймовірності виявлення для ТПВ каналу без комплексування набуває вигляду:

$$P_z(R) = \frac{\left(\frac{1,067}{R} - 0,96\right)^{1,01+0,35/R}}{1 + \left(\frac{1,067}{R} - 0,96\right)^{1,01+0,35/R}}. \quad (6.16)$$

а функція ймовірності виявлення для ОЕСС з комплексуванням набуває вигляду:

$$P_z(R) = \frac{\left(\frac{2,64}{R} - 0,96\right)^{1,01+0,87/R}}{1 + \left(\frac{2,64}{R} - 0,96\right)^{1,01+0,87/R}}. \quad (6.17)$$

Графіки функцій (6.16) та (6.17) представлено на рис. 6.30.

З рисунка видно, що ймовірність виявлення ТПВ каналу без комплексування перевищує 90 % при віддаленні об'єкта до 150 м, а з комплексуванням – при віддаленні об'єкта до 180 м. Ймовірність виявлення ТПВ каналу без комплексування дорівнює 50 % при відстані до об'єкта 290 м, а ОЕСС з комплексуванням – при відстані до об'єкта 330 м.

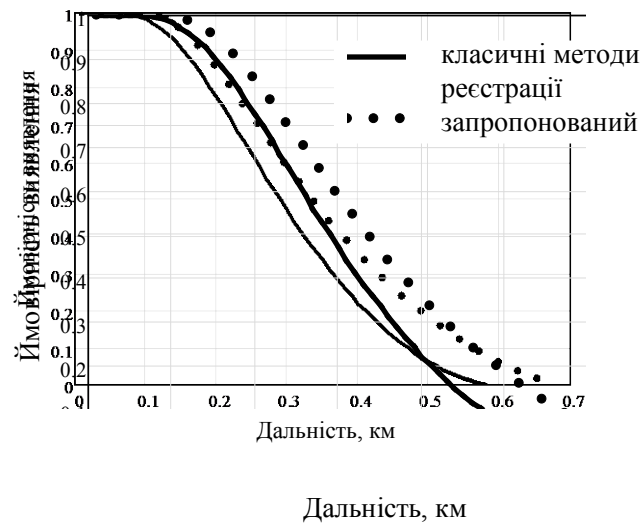


Рис. 6.30. Ймовірність виявлення об'єкта

Число штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50 % ймовірності розпізнавання, V_{50} становить 14,5 [9].

Після підстановки вхідних даних функція ймовірності розпізнавання для ТПВ каналу без комплексування набуває вигляду:

$$P_z(R) = \frac{\left(\frac{0,1}{R} - 0,18\right)^{1,27+0,033/R}}{1 + \left(\frac{0,1}{R} - 0,18\right)^{1,27+0,033/R}}. \quad (6.18)$$

а функція ймовірності розпізнавання для ОЕСС з комплексуванням набуває вигляду:

$$P_z(R) = \frac{\left(\frac{0,265}{R} - 0,18\right)^{1,27+0,087/R}}{1 + \left(\frac{0,265}{R} - 0,18\right)^{1,27+0,087/R}} \cdot \quad (6.19)$$

Графіки функцій (6.18) та (6.19) представлено на рис. 6.31.

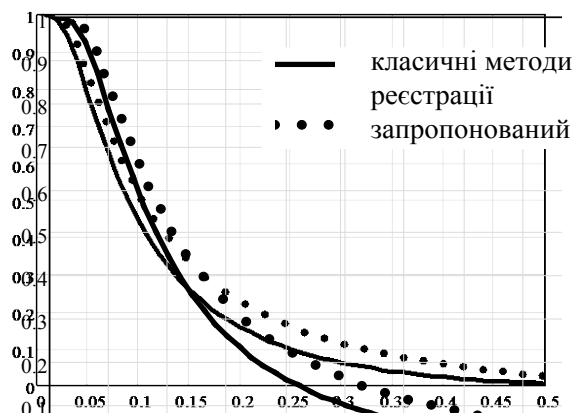


Рис. 6.31. Ймовірність розпізнавання об'єкта

З рисунка видно, що ймовірність розпізнавання для ТПВ каналу без комплексування перевищує 90 % при віддаленні об'єкта до 35 м, а для ОЕСС з комплексуванням – при віддаленні об'єкта до 42 м. Ймовірність розпізнавання ТПВ каналу без комплексування дорівнює 50 % при відстані до об'єкта 90 м, а з комплексуванням – при відстані до об'єкта 105 м.

Число штрихів, що розділяються, необхідних для забезпечення 50 % ймовірності правильної ідентифікації, V_{50} становить 18,8 [183].

Після підстановки вхідних даних функція ймовірності ідентифікації для ТПВ каналу без комплексування набуває вигляду:

$$P_3(R) = \frac{\left(\frac{0,082}{R} - 0,138\right)^{1,28+0,027/R}}{1 + \left(\frac{0,082}{R} - 0,138\right)^{1,28+0,027/R}} \cdot \quad (6.20)$$

а функція ймовірності ідентифікації для ОЕСС з комплексуванням набуває вигляду:

$$P_3(R) = \frac{\left(\frac{0,2}{R} - 0,138\right)^{1,28+0,067/R}}{1 + \left(\frac{0,2}{R} - 0,138\right)^{1,28+0,067/R}} \cdot \quad (6.21)$$

Графіки функцій (6.20) та (6.21) представлено на рис. 6.32.

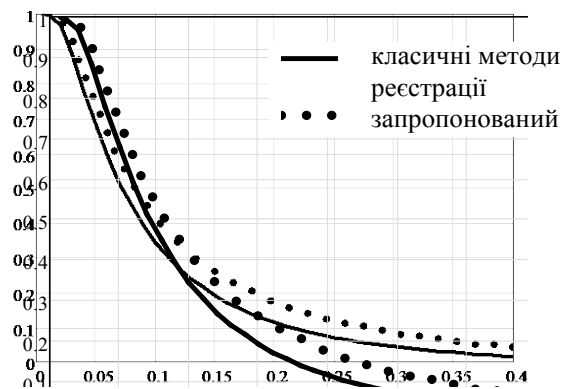


Рис. 6.32. Ймовірність ідентифікації об'єкта

З рисунка видно, що ймовірність ідентифікації для ТПВ каналу без комплексування перевищує 90 % при віддаленні об'єкта до 28 м, а при комплексуванні – при віддаленні об'єкта до 33 м. Ймовірність розпізнавання ТПВ каналу без комплексування дорівнює 50 % при відстані до об'єкта 72 м, а з комплексуванням – при відстані до об'єкта 83 м.

Результати розрахунків (рис. 6.30, рис. 6.31, рис. 6.32) показують, що комплексування дозволяє збільшити максимальну дальність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта до 12% за нормальних погодних умов

спостереження. Крім того, підвищується ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації при будь-якому віддаленні об'єкта [184].

Наведені числові дані та графіки дають уявлення про позитивний ефект від застосування вказаних методів за конкретних умов спостереження. Очевидно, що зміна цих умов викличе також зміну оціночних результатів.

Висновки до розділу 6

1. Вперше розроблено та експериментально підтверджено ефективність методології комплексування, яка передбачає використання показника успішності виконання завдання TTP при аналізі проходження сигналу через всі ланки інформаційного комплексу «ФЦО – ОЕСС – оператор», а також карти інформативності при паралельному комплексуванні зображень. Використання цієї методології забезпечує підвищення ймовірності правильного виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єктів ОЕСС. Запропоновано і реалізовано метод для реєстрації ТВ і ТПВ зображень за допомогою карти інформативності.

2. Запропоновано новий метод вибору основного інформаційного каналу при паралельному комплексуванні зображень в двоканальній ОЕСС на основі показника TTP в залежності від стану ФЦО, що дозволяє адаптивно змінювати алгоритми об'єднання зображень для забезпечення максимальної ефективності спостереження.

3. Запропоновано метод обробки зображень в ОЕСС в умовах вібрацій і руху платформи, в якому окрім компенсації лінійних зміщень підвищується роздільна здатність. В результаті забезпечується ряд переваг в порівнянні з існуючими методами: спрощується конструкція системи формування зображення за рахунок відсутності додаткових механічних елементів; відсутня необхідність в апріорній інформації про параметри зйомки.

4. Розроблено і експериментально підтверджено ефективність нового методу комплексування в двоканальних ОЕСС з поєднанням послідовного комплексування інформації в окремих каналах в процесі реєстрації для усунення

змазування зображення з наступним паралельним злиттям зображень різних інформаційних каналів, що дозволяє підвищити максимальну дальність виявлення об'єктів в двоканальних ОЕСС до 12%.

5. Запропоновані методи підвищення швидкості обробки інформації в багатоканальних ОЕСС. Зокрема досліджено метод злиття зображень з використанням карти інформативності на основі каналу низького просторового розділення й можливість застосування цифрового КОП в ОЕСС. Об'єм обчислень в першому випадку може зменшуватись до кількох разів. Отримано формули для розрахунку імпульсного відгуку і передавальної функції КОП, які дозволяють аналізувати і оптимізувати основні його характеристики.

ВИСНОВКИ

Наведені в дисертаційній роботі наукові положення та результати досліджень вирішують важливу науково-технічну проблему удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів підвищення ефективності функціонування багатоканальних ОЕСС з комплексуванням зображення, шляхом використання нових методів проектування і узгодження інформаційних каналів, впровадженні нових методів обробки сигналів, створенні більш точних засобів визначення основних характеристик окремих ланок і всієї інформаційної системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор» в цілому.

При виконанні дисертаційної роботи отримано такі наукові результати:

1. Вперше на базі розроблених моделей, сформульованих розрахункових методів, запропонованих технічних рішень створено науково обґрунтовані методологічні засади підвищення ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням зображень, які включають методи конструктивного узгодження характеристик основних блоків ОЕСС, механізм адаптивного вибору найкращого методу злиття зображень спектральних каналів, засоби експериментального визначення основних характеристик ОЕСС і дозволяють покращити якість виконання поточної задачі спостереження оператором.

2. Розроблено удосконалену математичну модель спектральних каналів ОЕСС, яка дозволяє більш точно аналізувати та синтезувати ОЕСС дистанційного зондування, узгоджувати основні параметри блоків системи з урахуванням як просторових, так і енергетичних їх характеристик й може використовуватись як основа для моделювання інформаційної системи «ФЦО – ОЕСС з комплексуванням – оператор».

3. Вперше на основі досліджень показників ефективності ТВ та ТПВ каналів і оцінок якості комплексування зображень запропоновано уніфікований метод оцінювання просторових й енергетичних властивостей каналів на основі показника якості *TTP*. Такий єдиний підхід дозволяє визначати головний інформаційний канал в ОЕСС як базовий для подальшого комплексування, а також узгоджувати

параметри вхідних блоків двоканальних ОЕСС, наприклад, діаметри вхідних зіниць об'єктів шляхом максимізації показника TTP .

4. Розроблено новий метод оцінювання ефективності функціонування ОЕСС з комплексуванням інформації на основі апостеріорного показника TTP , який визначається чисельно для даного способу злиття зображень по результуючому просторовому спектру ФЦО. Цей метод дозволяє дослідити особливості проходження сигналу через всі ланки системи «ФЦО – ОЕСС – оператор» й особливості процесу комплексування зображень та його зорового сприйняття оператором, дає можливість розрахувати ймовірність виявлення, розпізнавання та ідентифікації об'єкта в ОЕСС з комплексуванням й адаптивно змінювати спосіб злиття зображень в залежності від стану ФЦО.

5. Розроблено метод узгодження основних параметрів моноблочних коліматорних прицілів для автоматичної стрілецької зброї та запропоновані варіанти моноблочних коліматорних прицілів з підвищеною точністю прицілювання: приціл з двох оптичних деталей, склеєних по площині, забезпечує паралакс 3 мрад, а приціл з двох оптичних деталей, склеєних по сферичній поверхні, при такому ж діаметрі вихідної зіниці і масі забезпечує паралакс 1,25 мрад. Запропоновано метод розрахунку децентрованого телескопічного моноблока, в якому при паралактичній неузгодженості між лініями прицілювання і спостереження 3 мрад збільшення може досягати 1,6 крат порівняно з 1,4 крат для вісесиметричної схеми.

6. Вперше розроблено та експериментально підтверджено ефективність методології комплексування, яка передбачає використання показника TTP при аналізі проходження сигналу через всі ланки системи «ФЦО – ОЕСС – оператор» і виборі ведучого каналу, послідовне комплексування інформації в окремих каналах в процесі реєстрації для усунення змазування зображення та формування карти інформативності при паралельному комплексуванні зображень. Використання цієї стратегії дозволяє підвищити максимальну дальність виявлення об'єктів в двоканальних ОЕСС до 12%.

7. Розроблено новий метод вимірювання основних енергетичних

характеристик спектральних каналів ОЕСС. На базі цього методу розроблені засоби проектування вимірювального стенду з використанням оригінального дифузного випромінювача змінної яскравості. Теоретично і експериментально показано, що запропонований метод порівняно з аналогами забезпечує підвищення динамічного діапазону до 2,5 разів при високій однорідності поля яскравості.

8. Запропоновано нові методи підвищення швидкості обробки інформації в багатоканальних ОЕСС з комплексуванням: з використанням карти інформативності на основі каналу низького просторового розділення й застосуванням цифрового когерентно-оптичного процесора. Об'єм обчислень в першому випадку може зменшуватись до 2 разів. Отримано формули для розрахунку імпульсного відгуку і передавальної функції когерентно-оптичного процесора, які дозволяють аналізувати і оптимізувати основні його характеристики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Микитенко В.І. Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень [Текст] / Микитенко В.І. // Третя Українська науково-технічна конференція «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи» (4-5 грудня 2018 р.), КП СПБ «Арсенал». - Київ, 2018. - С. 55 - 58.
2. Микитенко В.І. Дослідження релевантних ознак зображень в ОЕП телевізійного типу [Текст] / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2006. - Вип. 31. - С. 24 - 31.
3. Глезер В.Д. Зрение и мышление [Текст] / Глезер В.Д. // СПб.: Наука, 1993. – 283 с.
4. Tenney R.R. Detection with distributed sensors [Текст] / R.R.Tenney, N.R.Sandell // IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst. - AES-17(4), -1981. - P.501-510.
5. Ajjimarangsee P. Neural network model for fusion of visible and infrared sensor outputs [Текст] / P.Ajjimarangsee, T.L.Huntsberger // Proc. SPIE. - v. 1003, - 1988. - P.153-160.
6. Luo R. Data fusion and sensor integration: state of the art in the 1990s [Текст] / R.Luo, M.Kay // Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence. – Academic Press, - San Diego. -1992. - P.7-136.
7. Samarasooriya V.N.S. A fuzzy modelling approach to decision fusion under uncertainty [Текст] / V.N.S. Samarasooriya, P.K.Varshney // Proc. IEEE. – 1996. – P.788-795.
8. Викторов А.С. Рисунок ландшафта [Текст] / Викторов А.С. // М.: Мысль, 1986. – 179 с.
9. Ллойд Дж. Системы тепловидения [Текст] / Ллойд Дж. // Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 417 с.
10. Микитенко В.І. Комплексування інформації в оглядово-візирних системах керованих рухомих об'єктів [Текст] / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2005. - Вип. 30. - С. 36 - 41.

11. Mykytenko V. Image fusion for surveillance applications: state of the art and new aspects [Текст] / Mykytenko V. // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2014. - С.53-54.
12. Богатирьова Г.В. Багатоканальні іконічні системи дистанційного моніторингу [Текст] / Богатирьова Г.В., Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Вісті академії інженерних наук України. - 2007. - №2(32). - С.21 - 26.
13. Колобродов В.Г. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія [Текст] / Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Поліграфічний центр «Аверс», Київ, 2013. – 178 с.
14. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.gisa.ru/concept_drs.html
15. Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate, September 2006 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://gosis.org/ios/GCOS_main_page.htm
16. Schuler J. Image Registration Techniques for Image Fusion [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.logostech.net/imagefusion2005/MasterClass_Image_Registration.pdf
17. Chen C. H. Modular Robotics and Intelligent Imaging for Unmanned Systems [Текст] / Chen C. H., Cheng C., Page D., Koschan A., Abidi M. // Proc. SPIE Unmanned Systems Technology VIII. April 2006.- Vol. 6230.- P. 43-52.
18. BAA2 Observation and Reconnaissance System. Проспект фірми Carl Zeiss GmbH, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.rheinmetall-defence.com/en/rheinmetall_defence/systems_and_products/c4i_systems/reconnaissance_and_sensor_systems/baa_observation_and_reconnaissance_equipment/index.php
19. Ultra 9HD. Проспект фірми FLIR Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.yumpu.com/en/document/view/20932901/ultra-9hd-flir-systems>

20. EUROFLIR Gyro-Stabilized Electro-Optical Airborne System. Проспект фірми Sagem [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.angelopodesta.com/documenti/09_12_Euroflir_D1224.pdf
21. MARGOT 5000: MANON. Проспект фірми Thales Group [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/defence/margot-3000-8000-surveillance-equipment>
22. Integrated Optoelectronic Module [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pcosa.com.pl/en/integrated-optoelectronic-modules/>
23. Бюро научно-технической информации: двухспектральная система видеонаблюдения «Грифон» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.bnti.ru/des.asp?itm=4964&tbl=19.01.01>.
24. Колобродов В.Г. Вибір оптико-електронної системи малорозмірного університетського супутника [Текст] / Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., Марченко В.О., Микитенко В.І. // Вісник ЧДТУ. - 2008. - №2. - С. 167 - 172.
25. Микитенко В.І. Комплексування зображень в багатоканальних оптико-електронних системах з різноформатними матричними приймачами випромінювання [Текст] / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісті академії інженерних наук України. - 2008. - №3 (37). - С.38 - 44.
26. Волков В. Г. Тепловизионные и многоканальные приборы для бронемашин [Текст] / В. Г. Волков // Специальная техника. – 2005. – №1. – С. 2-20
27. Колобродов В.Г. Тенденції розвитку космічних оптико-електронних систем спостереження Землі [Текст] / Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2007. - №3. – С.115-120.
28. Колобродов В.Г. Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли [Текст] / Колобродов В.Г., Бородийчук П.В., Микитенко В.І. // Космічна наука і технологія. - 1998. - т.4, №1. - С.29-38.
29. Kolobrodov V. University Nanosatellite Television Camera [Текст] / V. Kolobrodov, O. Lysenko, V. Mykytenko, V. Sokurenko // IEEE Conference Proceedings. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kyiv, 2019. - P. 543-547.

30. Сенаторов Н.В. Классификация и методика сопоставительного анализа оптических схем коллиматорных прицелов [Текст] / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003. - Вып. 7. - С.8-12.
31. Кожохин В.В. Оптические прицелы с точки зрения оптика-конструктора [Текст] / Кожохин В.В. // Ружье. -1999.- № 5.- С.33-37.
32. Шобер М. Стрельба с оптическим прицелом [Текст] / Шобер М. // Ружье. - 1998. - № 5. - С.22-25.
33. Мураховский В.И. Оружие пехоты [Текст] / Мураховский В.И., Федосеев С.Л. - М.: Арсенал-Пресс, 1992. - 500с.
34. Жук А.Б. Стрелковое оружие [Текст] / Жук А.Б. - М.: Воен. издат., 1992. - 480 с.
35. Ананьев И.Н. Основы устройства прицелов [Текст] / Ананьев И.Н. - М.: Военное издательство министерства вооруженных сил Союза ССР, 1947.- 440 с.
36. Сакин И.Л. Инженерная оптика [Текст] / Сакин И.Л. - Л-д: Машиностроение, 1976. - 255 с.
37. Гурнович А.В. Сопоставительный анализ телескопических прицелов для стрелкового оружия [Текст] / Гурнович А.В., Сенаторов Н.В., Колобродов В.Г., Микитенко В.И. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический журнал. - 2004.- №3(12). – С.35-41.
38. Микитенко В.И. Оптимизация конструкции моноблочного коллиматорного прицела [Текст] / Микитенко В.И., Сенаторов Н.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003.- Вып. 8. - С.27-29.
39. Котовський В.Й. Метод функціональної діагностики стану мікросудинної системи на основі обміну кисню та теплового випромінювання [Текст] / Котовський В.Й., Ройтман Е.М., Микитенко В.І. // XXVII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми електроніки», ч. 2. Сборник тезисов докладов / НТУУ «КПІ», Факультет електроніки. - Киев, 2007. – С.83-85.

40. Воронов С.О. Перспективи розвитку та застосування тепловізійних систем [Текст] / Воронов С.О., Котовський В.Й. // Вісті академії інженерних наук України. – 2002. - №1(14). – С. 17 – 19.
41. U.S. Department of Defense, Data Fusion Subpanel of the Joint Directors of Laboratories, Technical Panel for C3, «Data fusion lexicon» 1991 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a529661.pdf>
42. Дистанционное зондирование: количественный подход [Текст] / Под ред. Свейна Ф. и Дейвиса Ш. // Пер. з англ. - М.: Надра, 1983. – 352 с.
43. Kopeika N. S. A System Engineering Approach to Imaging [Текст] / Kopeika N. S. - SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, USA, 1998. – 679 p.
44. Super-resolution image reconstruction: a technical overview // IEEE Signal Processing Magazine. – 2003. – Issue 5. – pp. 21-36 [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
http://www.ee.iisc.ac.in/people/faculty/soma.biswas/STIP_pdf/SR_overview.pdf
45. Hadar O. Image motion restoration from a sequence of images [Текст] / Hadar O., Robbins M., Novogrozky Y., Kaplan D. // Optical Engineering. – 1996. – Vol. 35. – Issue 10. – P. 2898-2904.
46. Farsiu S. Advances and challenges in super-resolution [Текст] / Farsiu S., Robinson D., Elad M., Milanfar P. // Imaging Syst Technol - 2004. - Vol. 14. - Issue 5. - P.47-57.
47. Тарасов М.М. Инфракрасные системы «смотрящего» типа [Текст] / Тарасов М.М., Якушенков Ю.Г. - М.: Логос, 2004. - 444 с.
48. Driggers Ronald G. Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems. Second Edition [Текст] / Ronald G. Driggers, Melvin H. Friedman, Jonathan Nichols. - Artech House, 2012. - 583 p.
49. Friedenberг A. Microscan in infrared staring systems [Текст] / Friedenberг A. // Optical Engineering. - 1997. – Vol. 36. – Issue 6. - P. 1745-1749.
50. Wiltse J.M. Imagery improvements in staring infrared imagers by employing subpixel microscan [Текст] / Wiltse J.M., Miller J.L. // Optical Engineering. – 2005. – Vol. 44. – Issue 5. - P. 56-61.

51. Gillette Joseph C. Aliasing reduction in staring infrared imagers utilizing subpixel techniques [Текст] / Joseph C. Gillette, Thomas M. Stadtmiller // Optical Engineering. 1995. – Vol. 34. – Issue 11. - P. 3130-3137.
52. Hadar O. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV: real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification [Текст] / O. Hadar , I. Dror, N. S. Kopeika // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33, № 2. – P. 566-578.
53. Barron J.L. Performance of optical flow techniques [Текст] / Barron J.L., Fleet D.J., Beauchemin S.S. // IJCV. – 1994. – Vol.12. – Issue 1. – P. 43-77.
54. Changming Sun Fast optical flow using 3D shortest path techniques [Текст] / Changming Sun // Image and vision computing, 2002. – Vol.20. – Issue 13-14. – P. 981-991.
55. Flusser J. Image fusion: principles, methods, and applications [Текст] / J. Flusser, F. Sroubek, B. Zitova // European Signal Processing Conference EUSIPCO, 2007.
56. Kullback S. On information and sufficiency [Текст] / S. Kullback, R. A. Leibler // The Annals of Mathematical Statistics. – 1951. – Vol. 22, № 1. – P. 79-86.
57. Senthil Kumar S. PCA-based image fusion [Текст] / Kumar S. Senthil, S. Muttan // Proc. SPIE. – 2006. – Vol. 6233. – P. 62331T.
58. Sharma R. K. Adaptive and statistical image fusion [Текст] / R. K. Sharma, Misha Pavel // SID Digest. – 1996. – Vol. XXVII. – P. 969-972.
59. Comhaire A. L. The contribution of ERS-1 and SPOT data in the morphologic and bathymetric study of the north sea and the Scheldt [Текст] / Comhaire A. L., Ozer A., Jaspar A. // Proceedings of First ERS-1 Pilot Project Workshop, Toledo, Spain, 22 - 24 June 1994, SP-365 (Paris: European Space Agency).- P. 297 - 302.
60. Gillespie A. R. Colour enhancement of highly correlated images. I. Decorrelation and HSI contrast stretches [Текст] / Gillespie A. R., Kahle A. B., Walker R. E. // Remote Sensing and Environment, 1987.- №20.- P. 209 - 235.
61. Daily M. Hue-saturation-intensity split-spectrum processing of SEASAT radar imagery [Текст] / Daily M. // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1983, №49, P. 349 - 355.

62. Carper W. J. The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT Panchromatic and multispectral image data [Текст] / Carper W. J., Lillesand T. M., Kieffer R.W. // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990.- №56.- P. 459 - 467.
63. Chiesa C. C. Data fusion of off-nadir SPOT panchromatic images with other digital data sources. ACSM-ASPRS Annual Convention [Текст] / Chiesa C. C., Tyler W. A. // Image Processing and Remote Sensing, 1990.- №4.- P.86 – 98.
64. Guo H.D. Integrated MSS-SAR-SPOT-geophysical geochemical data for exploration geology in Yeder [Текст] / Guo H.D., Pinliang D. // CAS-IRSA, 1989. - P. 1- 8.
65. Welch R. Merging multiresolution SPOT HRV and Landsat TM data [Текст] / Welch R., Ehlers M. // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, №53.- 1987.- P.301 - 303.
66. Price J. C. Combining panchromatic and multispectral imagery from dual resolution satellite instruments [Текст] / Price J. C. // Remote Sensing of Environment, 1987.- №21.- P.119 - 128.
67. Munechika C. K. Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy [Текст] / Munechika C. K., Warnick J. S., Salvaggio, C., Schott J. R. // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993.- №59.- P.67 – 72.
68. Singh A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data [Текст] / Singh A. // International Journal of Remote Sensing.-. 1989.- №10.- P.989 – 1003.
69. Griffiths G. H. Monitoring urban change from Landsat TM and SPOT satellite imagery by image differencing [Текст] / Griffiths G. H. // Proceedings IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '88), Edinburgh, Scotland, 13 - 16 September 1988.- P. 493 – 497.
70. Shettigara V. K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set [Текст] / Shettigara V. K. // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992.- №58.- P.561 – 567.

71. Fung T. Application of Principal Component Analysis to change detection [Текст] / Fung T., LeDrew E. // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987.- №53.- P.1649 – 58.
72. Chavez P. S. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: TM & SPOT pan [Текст] / Chavez P. S., Sides S. C., Anderson J. A. // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1991.- №57.- P.295 - 303.
73. Richards J. A. Thematic mapping from multitemporal image data using the principal component transformation [Текст] / Richards J. A. // Remote Sensing of Environment, 1984.- №16.- P.35 - 46.
74. Jutz S. L. Geological mapping and detection of oblique extension structures in the Kenyan Rift Valley with a SPOT/Landsat-TM datamerge [Текст] / Jutz S. L., Chorowicz J. // International Journal of Remote Sensing, 1993.- №14.- P.1677 - 1688.
75. Campbell N. A. Towards more quantitative extraction of information from remotely sensed data [Текст] / Campbell N. A. // Advanced Remote Sensing, Conference Proceedings, Sydney, Australia.- 1993.- №2.- P.29 – 40.
76. Tang Z.W. The wavelet transformation application for image fusion [Текст] / Tang Z.W., Wang J.G., Huang S.J. // Wavelet Application VII, H. H. Szu, ed., Proc. SPIE 4056.- 2000.- P.462-469.
77. Li H. Multisensor image fusion using the wavelet transform [Текст] / Li H., Manjunath B.S., Mitra S.K. // Graphical Models Image Processing №57.- 1995.- P.235-245.
78. Nunez J. Multiresolutionbased image fusion with additive wavelet decomposition [Текст] / Nunez J., Otazu X., Fors O., Prades A., Pala V.// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, Vol. 37.- No. 3.- P. 1204-1211.
79. Yocky D.A. Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT panchromatic data [Текст] / Yocky D.A. // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, Vol. 62.- №. 9.- P. 1067-1074.
80. Koopmans B. N. Optimal geological data extraction from SPOTRadar synergism with samples from Djebel Amour (Algeria), Red Sea Hills (Sudan), Sirte Basin (Libya)

and Magdalena Valley (Colombia) [Текст] / Koopmans B. N., Richetti E. // From Optics to Radar, SPOT and ERS Applications, Conference Proceedings, 10 - 13 May 1993, Paris, France.- P. 263 - 274.

81. Ye'sou H. Merging Seasat and SPOT imagery for the study of geologic structures in a temperate agricultural region [Текст] / Ye'sou H., Besnus Y., Rolet J., Pion J. C. // Remote Sensing of Environment, №43.- P.265 - 280.

82. Loercher G. Integrated use of optical and radar data from the MACEurope campaign 1991 for geological mapping of the Hekla area [Текст] / Loercher G., Wever T. // Proceedings First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg, France, 11 - 15 September 1994.- P. III-471- III-478.

83. Rockinger O. Pixel-level image fusion: the case of image sequences / O. Rockinger, T. Fechner [Текст] / Rockinger O. // Proc. SPIE. – 1998. – Vol. 3374. – P. 378-388.

84. Shapiro L. G. Computer vision [Текст] / Linda G. Shapiro, George C. Stockman. – Prentice Hall, 2001. – 580 p.

85. Frucci M. From segmentation to binarization of gray-level images [Текст] / Maria Frucci, Gabriella Sanniti di Baja // Journal of Pattern recognition Research. – 2008. – № 1. – P. 1-13.

86. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [Текст] / N. Otsu // IEEE Transactions on Systems. Man and Cybernetics. – 1979. – Vol. SMC-9.- № 1.- P. 62-66.

87. Cremer F. A comparison of decision-level sensor-fusion methods for anti-personnel landmine detection [Текст] / F. Cremer, K. Schutte, J. G. M. Schavemaker [et al.] // Information Fusion. – 2001. – №2. – P. 187-208.

88. Liggins M. E. Extensions to adaptive Boolean decision fusion [Текст] / Martin E. Liggins // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4729. – P. 288-296.

89. Колобродов В.Г. Створення оптико-електронного блоку цифрової кадрової фотокамери космічного базування [Текст] / Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Бараненко І.В. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С. 52 - 53.

90. Тимчик Г.С. Обґрунтування параметрів оптико-електронної системи спостереження для мікосупутників [Текст] / Тимчик Г.С., Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Перша Всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (3-5 червня 2008 р.). Збірник тез доповідей / КП СПБ «Арсенал». - Київ, 2008. - С. 47 - 48.
91. Колобродов В.Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження [Текст] / Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. - Київ: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
92. Колобродов В.Г. Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження: монографія [Текст] / В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко, Є.Г. Балінський - Київ: Вік прінт, 2017. - 202 с.
93. Микитенко В.І. Моделювання зображення у задачах комплексування каналів оптико-електронних систем [Текст] / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2007. - Вип. 33. - С. 24 - 29.
94. Микитенко В.И. Показатель качества изображений в многоканальных оптико-электронных системах с поляризационным каналом [Текст] / Микитенко В.И., Плави Ванзос Эмилия Сильвиянь // Международный научный журнал. - 2016. - №3. - С.78 - 83.
95. Микитенко В.І. Модель оптичного зображення для комплексування у багатоканальних оптико-електронних системах [Текст] / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С. 56 - 57.
96. Kolobrodov V. H. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System's Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles [Текст] / Kolobrodov, V. H., Lykholit, M. I., Mykytenko, V. I., Tiagur, V. M., Dobrovolska, K. V. // Visnyk NTUU KPI. Seriiia Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. - 2017. - Iss. 69. - P.30-34.
97. Микитенко В.І. Комплексування зображень у цілодобових двоканальних системах спостереження [Текст] / Микитенко В.І., Балтабаєв М. М., Пономаренко

- О. А. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.- 2014. – Вип. 48. – С. 43 – 49.
98. Микитенко В.І. Підвищення ефективності роботи тепловізійної системи при спостереженні малорозмірних цілей на морському фоні [Текст] / Микитенко В.І., Подрига С.І. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2011. - №2(38). С.56 – 59.
99. Микитенко В.І. Вплив оптичних характеристик поверхонь об'єкту на аналіз його теплового стану [Текст] / Микитенко В.І. // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2012. - С.64.
100. Котовський В.Й. Исследование тепловой составляющей окислительно-восстановительных процессов методом динамической термографии [Текст] / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Електроніка і зв'язь. Тематический выпуск «Проблеми електроніки». - 2008. - Ч.2 - №3-4. - С.93 - 95.
101. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов, 5-е изд. [Текст] / Якушенков Ю.Г. – М.: Логос, 2004. – 472 с.
102. Melamed R. Experimental comparison of three target acquisition models [Текст] / Melamed R., Yitzhaky Y., Kopeika N.S., Rotman S.R. // Optical Engineering. – 1998 – Vol. 37. - No7. - P. 1902 - 1913.
103. Колобродов В. Г. Вплив аберацій об'єктива на просторове розділення космічного ОЕСС [Текст] / Колобродов В. Г. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2000. - № 5.- С. 110-112.
104. Kolobrodov Valentin G. Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles [Текст] / Valentin G. Kolobrodov; Catherine V. Dobrovolska; Volodymyr I. Mykytenko; Grygorij S. Tymchik; Volodymyr M. Tiagur; Paweł Komada; Assel Mussabekova; Aliya Targeusizova; Aigul Iskakova // Proceedings of SPIE V. 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High Energy Physics Experiments 2017; 104450J.

105. Schuster N. Infrarotthermographie (Zweite, uberarbeitete und erweiterte Ausgabe) [Текст] / Schuster N., Kolobrodov V.G. // Berlin: Wiley-VCH Verlag Gmb & Co. KGaA, 2004. – 356 p.
106. Mykytenko V. The impact of phase distortions in matrix imagers with information fusion on image quality [Текст] / Mykytenko V. // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2015. - С. 50.
107. Карасик В.Е. Лазерные системы видения: Учебное пособие [Текст] / Карасик В.Е., Орлов В.М. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 352 с.
108. Мирский Г.Я. Аппаратное определение характеристик случайных процессов [Текст] / Мирский Г.Я. – М.: Энергия, 1972. – 264 с.
109. Вафиади А.В. Вычисление сигнала и шума на выходе тепловизионного прибора [Текст] // В кн.: Тепловидение. Межвуз. сб. научн. трудов / Под ред. Н.Д. Куртева. – М.: Изд-во МИРЭА, 1994. – №10 – С. 10 – 18.
110. Балахонова Н. О. Порівняння якості роботи фільтрів для зменшення шумів зображень тепловізійного каналу оглядових оптико-електронних пристроїв [Текст] / Балахонова Н. О., Микитенко В. І., Пашков Р. А. // Вісник КПІ. Серія приладобудування. - 2019. - Вип. 57(1). - С.26 - 35.
111. Vollmerhausen R. Influence of sampling on target recognition and identification [Текст] / Richard Vollmerhausen, Ronald G. Driggers, Barbara L. O’Kane // Opt. Eng., 38(5), 763-772 (May 01, 1999).
112. Микитенко В.І. Моделювання роботи оператора в пошуково-прицільних оптичних і оптико-електронних системах [Текст] / Микитенко В.І. // II науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22–23 квітня 2003 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2003. - С.55.
113. Микитенко В.І. Анализ задач визуального поиска и распознавания [Текст] / Микитенко В.І. // V Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (25-26 квітня 2006 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2006. - С.78-79.

114. Ratches J.A. Static performance model for thermal imaging systems [Текст] / Ratches J.A. // Opt.Eng. - 1976, v.15, №3. P. 525-530.
115. Leachtenauer J.C. National imagery interpretability rating scales: overview and product description [Текст] / Leachtenauer J.C. // ASPRS/ASCM Annual Convention and Exhibition Technical Papers: Remote Sensing and Photogrammetry. – 1996, №1. - P. 262-272.
116. Зинченко В.П. Основы эргономики [Текст] / Зинченко В.П., Мунипов В.М. – М: Изд.МГУ. – 1979. – 344 с
117. Грановская Р.М. Восприятие и признаки формы [Текст] / Грановская Р.М., Березная И.Я., Григорьева А.Н. - М.: Наука, 1981.- 208 с.
118. Микитенко В.И. Полунатурная модель цели для определения исходных данных стрельбы из стрелкового оружия [Текст] / Сенаторов Н.В., Лагно Ю.В., Микитенко В.И., Гурнович А.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2004.- №2(11). - С.35-37.
119. Травникова Н.П.Эффективность визуального поиска / Травникова Н.П. - М.: Машиностроение, 1985, 126 с.
120. Perception of Displayed Information [Текст] / Biberman L.M., Ed. - Plenum Press, N.York, 1973. - 340 p.
121. Christie R.E. Review and analysis of color coding research for visual displays [Текст] / Christie R.E. // Human factors. - 1975, v.17, №6. - P. 542-570.
122. Юхно П.М. Исследование особенностей визуального поиска в условиях временных ограничений и неопределенности относительно наличия объекта в зоне поиска [Текст] / Юхно П.М., Огреб С.М., Марек Я.Л. // Оптический журнал. - т.69, №5. - С. 52-55.
123. Fairhurst A.M. Method of predicting the probability of human observers recognizing targets in simulated thermal images [Текст] / Fairhurst A.M., Lettington A.H. // Opt.Eng. – 1998, v.37, №3. - P. 744-751.
124. Вифанский Ю.К. Об опознавательных признаках объектов [Текст] / Вифанский Ю.К., Мироненко И.А. // Труды ГОИ им. С.И.Вавилова.- 1984, том 57, вып. 191. - С. 153-158.

125. Завалишин Н.В. Модели зрительного восприятия и алгоритмы анализа изображений [Текст] / Завалишин Н.В., Мучник И.Б. - М.: Наука, 1974.- 344 с.
126. Миракян А.И. Восприятие скорости движения в процессе отражения формы объекта [Текст] / Миракян А.И., Панов В.И. // Вопросы психологии, 1985.- №1. - С.148-154.
127. Бенуни А.А. Модель зрительной системы человека-оператора [Текст] / Бенуни А.А., Колючкин В.Я. // Вестник МГТУ: Приборостроение, 2002. - №4.- С. 43-52.
128. Бенуни А.А. Методика оценки качества ОЭП наблюдения по эквивалентным синусоидальным мирам [Текст] / Бенуни А.А., Колючкин В.Я. // Прикладная оптика: Сборник трудов 5-ой Международной конференции.- СПб., 2004.-Т.1 - Оптическое приборостроение.- С. 54.
129. Колючкин В.Я., Мосягин Г.М. Тепловизионные приборы и системы: Учебное пособие [Текст] / Колючкин В.Я., Мосягин Г.М. -М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.- 52с.
130. Qu G., Zhang D. Information measure for performance of image fusion [Текст] / Qu G., Zhang D., Yan P. // Electronic Letters. – 2002. – Vol. 38, № 7. – P. 313–315.
131. Gabarda S. Blind image quality assessment through anisotropy [Текст] / Gabarda S., Cristybal G. // Journal of the Optical Society of America. – 2007. – Vol. 24, № 12. – P. B42–B51.
132. Xydeas C.S. Objective image fusion performance measure [Текст] / Xydeas C.S., Petrovic V. // Electronics Letters. – 2000. – Vol. 36, № 4. – P. 308–309.
133. Holst G. C. Electro-optical imaging system performance. 5th ed. [Текст] / Holst Gerald C. – Winter Park, Florida: JCD Publishing, 2008. – 502 p.
134. Vollmerhausen R. H. The Targeting Task Performance Metric. A New Model for Predicting Target Acquisition Performance [Текст] / Vollmerhausen R. H., Jacobs E. - Technical Report, AMSEL-NV-TR-230, 2003. – 119 p.
135. Krebs W.K. An evaluation of a sensor fusion system to improve drivers' nighttime detection of road hazards [Текст] / Krebs W.K., McCarley J.M., Kozek T, Miller G.M.,

- Sinai M.S., Werblin F.S. // Proceedings of the 43rd Annual Meeting Human Factors and Ergonomics Society. – 1999. - №43. – P.1333-1337.
136. Микитенко В.І. Визначення ефективності оглядових оптико-електронних систем безпілотних літальних апаратів [Текст] / Микитенко В.І. // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2016. - С.51 - 52.
137. Mykytenko V. Dual-band surveillance imagers evaluation [Текст] / Mykytenko V. // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2019. - С. 50 - 51.
138. Krebs W.K. Comparing behavioral receiver operating characteristic curves to multidimensional matched filters [Текст] / Krebs W.K., Scribner D.A., McCarley J.S. // Opt. Eng. - 2001. V.40. - №9. - P.1818-1826.
139. Waxman A.M. Progress on color night vision: visible/IR fusion, perception and search, and low-light CCD imaging [Текст] / Waxman A.M, Gove A.N., Seibert M.C. et all. // Proceedings of SPIE. – 1996. - V.2736. - P. 96-107.
140. Krebs W.K. Psychophysical Assessments of Image-Sensor Fused Imagery [Текст] / Krebs W.K, Sinai M.J. // Human Factors. - 2002. - V.44. - №2. - P. 257-271.
141. Steele P.M. Part task investigation of multispectral image fusion using gray scale and synthetic color night vision sensor imagery for helicopter pilotage [Текст] / Steele P.M., Perconti P. // Proceedings of SPIE. – 1997. - V. 3062. - P. 88-100.
142. Essock E. A. Human Perceptual Performance With Nonliteral Imagery: Region Recognition and Texture-Based Segmentation [Текст] / Essock E. A., Sinai M. J., DeFord J. K., Hansen B. C., Srinivasan N. // Journal of Experimental Psychology. - 2004. - V. 10, №. 2. - P. 97-110.
143. Endsley M. R. Situation awareness global assessment technique (SAGAT) [Текст] / Endsley M. R. // Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference (NAECON). (New York: IEEE). - 1988. - P. 789-795.

144. Sinai M.J. Psychophysical comparisons of single and dual-band fused imagery [Текст] / Endsley M. R. // Proceedings of the SPIE-Synthetic Advanced Vision.-1999.- V. 3691. - P. 1-8.
145. Микитенко В.І. Вибір показника якості в багатоканальних бортових оглядово-пошукових оптико-електронних системах [Текст] / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2007. - Вип. 34. - С.40 - 45.
146. Beghdadi A. Image quality assessment using the Joint Space/Spatial-Frequency Representation [Текст] / Beghdadi A., Iordache R. // EURASIP Journal on Applied Signal Processing. - 2006. - V. 2006. - Article ID 80537. - P. 1-8.
147. Аксютлов Л.Н. Операционные пороги пространственного разрешения зрительной системы и восприятия контрастов объектов [Текст] / Аксютлов Л.Н. // Оптический журнал. – 2002. - №8. – С. 36-42.
148. Matchko R.M., Gerhart G.R. ABCt of foveal vision [Текст] / Matchko R.M., Gerhart G.R. // Optical Engineering. - 2001. – V.45. – №12. – P. 2735 – 2745.
149. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений [Текст] / Красильников Н.Н. - М.: Радио и связь. – 1986. - 247 с.
150. Wang Y. Multisensor image fusion: concept, method and applications [Текст] / Wang Y., Lohmann B. - Technical report, University of Bremen. - 2000. - 11 p.
151. Piella G. New quality measures for image fusion [Текст] / Piella G. // Proceeding of the 7th International Conference on Information Fusion. – Stockholm. - July 2004. - P. 1559-1564.
152. Wang Z. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity [Текст] / Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. // IEEE Transactions on Image Processing. - 2004. - V.13.- P. 600-612.
153. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учебное пособие для вузов [Текст] / Мирошников М.М. - Л.: Машиностроение, 1977. - 600 с.
154. Hall David L. Handbook of multisensor data fusion. Theory and practice [Текст] / David L. Hall, James Llinas. – [2th ed.]. - CRC Press. Taylor & Francis Group, 2009. - 872 p.

155. Nachmias J. On the psychometric function for contrast detection [Текст] / Nachmias J. // Vision Research 1981, v.21. - P. 215-223.
156. Campbel F. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings [Текст] / Campbel, F. W.; Robson, J. G. // Journal of Physiology, 1968, v.197. - P.551-566.
157. Biederman I. Recognition-by-components: A theory of human image understanding [Текст] / Biederman I. // Psychological Review, 1987, v.94. - P.115-117.
158. Rosenfeld D. Context-free attentional operators: the generalized symmetry transform [Текст] / Rosenfeld D., Wolfson H. Yeshurun Y. // International Journal of Computer Vision, 1995, v.14. - P.119-130.
159. Nothdurft H. C. Texture segmentation and pop-out from orientation contrast [Текст] / Nothdurft H. C. // Vision Research, 1991, 31, P.1073-1078.
160. Johnson J. Analysis of image forming systems [Текст] / Johnson J. // Proceedings of the Image Intensifier Symposium, 1958. - P. 249-273.
161. Toet A. Target acquisition in complex scenes, part A: Search and conspicuity models [Текст] / Toet A. // TNO Human Factors Institute, Soesterberg, Netherlands, ADA 332390, 1996.
162. Tidhar G. Modeling human search and target acquisition performance: IV, detection probability in the cluttered environment [Текст] / Tidhar G.; Reiter G.; Avital Z.; Hadar, Y.; Rotman S. R.; George V.; Kowalczyk M. L. // Optical Engineering, 1994, v.33, P.801-808.
163. Bijl P. Triangle orientation discrimination: The alternative to minimum resolvable temperature difference and minimum resolvable contrast [Текст] / Bijl, P.; Valeton, J. M. // Optical Engineering, 1998, v.37.- P.1976-1983.
164. Bishop A. B. The tank weapons system: DYN-TACS model [Текст] / Bishop, A. B.; Stollmack, S. - Ohio State University. (DTIC report AD 850367), 1968.
165. Bailey H. H. Target detection through visual recognition: A quantitative model [Текст] / Bailey, H. H. - Santa Monica, CA: Rand Corporation, AD 721446. (Rand report RM-6158/1-PR), 1970.
166. Coltman J.W. The specification of imaging properties by response to a sine-wave input [Текст] / Coltman J.W. // J. Opt. Soc. America, 1954, v.44, №6.

167. Infrared and Electro-Optical System Handbook [Текст] / Ed. By J.S.Accenta D.L.Shumaker. – Bellingham: SPIE Proc., 1993. - 3024 p.
168. Kolobrodov V. G. Refinement of thermal imager minimum resolvable temperature difference calculating method [Текст] / Kolobrodov V. G., Mykytenko V. I. // Proc. SPIE 9809, Twelfth International Conference on Correlation Optics, 98090C (November 30, 2015).
169. Аль-Мзіраві А.М.Л. Удосконалення розрахунку мінімальної роздільної різниці температур медичного тепловізора [Текст] / А.М.Л. Аль-Мзіраві, Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2014. - №5 (97). - С.96 - 100.
170. Аль-Мзірави Ахмед М.Л. Расчет минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных приборов [Текст] / Ахмед М.Л. Аль-Мзірави, Колобродов В.Г., Микитенко В.И. // Приборы и методы измерений. - 2015 г., № 1(10). - С.64 - 69.
171. Barten P.G.J. Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality [Текст] / P.G.J. Barten. - Bellingham: SPIE Press, 1999. – 211 p.
172. Horrigan T.J. Assessing the search and detection problem via the FLIR – Target Acquisition Model (FTAM) [Текст] / Horrigan T.J. // SPIE Proc. – 2000. – V.4029. – P. 197 – 204.
173. Ratches J.A. Night Vision Modeling; Historical Perspective [Текст] / Ratches J.A. // SPIE Proc. – 1999. – V. 3701. – P.2 – 12.
174. Edwards T.C., Vollmerhausen R. Recent improvements in modeling time limited search [Текст] / Edwards T.C., Vollmerhausen R. // SPIE Proc. 2002. -V. 4719. - P. 42-50.
175. Сенаторов Н.В. Оценка эффективности выполнения боевой задачи оператором стрелкового оружия с оптическим прицелом [Текст] / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И., Гурнович А.В., Лагно Ю.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2005. - №1(14). - С.4-7.

176. Рибалко М.С. Оцінка показників якості комплексованих зображень в двоканалних ОЕСС [Текст] / Рибалко М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. // Вісник ЧДТУ. - 2011. - №4. - С.57 - 62.
177. Микитенко В.І. Оцінка якості комплексування зображень в багатоканальних оптико-електронних системах [Текст] / Микитенко В.І. // V Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (25–26 квітня 2006 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2006. - С.79-80.
178. Микитенко В.І. Оцінка ефективності двоканалної ОЕСС з функцією комплексування інформації [Текст] / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2012. - С.72 - 73.
179. Мамута М. С. Оцінка ефективності двоканалної ОЕСС з комплексуванням інформації за різних зовнішніх умов функціонування [Текст] / Мамута М. С., Мамута О. Д., Микитенко В.І. // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2013. - С.66-67.
180. Toet A. Fusion of visible and thermal imagery improves situational awareness [Текст] / Toet A., Ijspeert J.K., Waxman A.M., Aguilar M. // Displays. – 1997. – Vol. 18. – P. 85-95.
181. Blum R. S. Multi-Sensor Image Fusion and Its Applications [Текст] / Blum R. S. and Lui Z. – CRC Press, 2006. – 499 p.
182. Renyi A. Some fundamental questions of information theory [Текст] / Renyi A. // Selected papers of Alfred Renyi. – 1976. – Vol. 3. – P. 526-552.
183. Vollmerhausen R. H. Analysis and evaluation of sampled imaging systems [Текст] / Vollmerhausen, R. H., Reago D., Driggers R. G. – SPIE Press, 2010. – 304 p.
184. Колобродов В.Г. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації [Текст] / Колобродов В.Г.,

- Мамута М.С., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2012. - №6(86). - С.127 - 131.
185. Rodgers J. L. Thirteen ways to look at the correlation coefficient [Текст] / Rodgers J. L., Nicewander W. A. // The American Statistician. – 1988. – Vol. 42, № 1. – P. 59–66.
186. Vollmerhausen R. H. New metric for predicting target acquisition performance [Текст] / Vollmerhausen R. H., Jacobs E., Driggers R.G. // Optical Engineering. – 2004. – Vol. 43, № 11. – P. 2806–2818.
187. Barten Peter G.J. Formula for the contrast sensitivity of the human eye [Текст] / Barten Peter G.J. // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5294. – P. 231–238.
188. Vollmerhausen R. Night vision integrated performance model: impact of a recent change on the model's predictive accuracy [Текст] / Richard Vollmerhausen // Optics Express. – 2016, Vol. 24, Issue 21, P. 23654-23666.
189. Mykytenko V. Infrared surveillance imagers application [Текст] / Mykytenko V. // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2018. - С. 51 - 52.
190. Kolobrodov V. Substantiation of a university nanosatellite television camera parameters [Текст] / Valentin Kolobrodov, Volodymyr Mykytenko, Vyacheslav Sokurenko, Andrzej Smolarz, Assel Mussabekova, Samat Sundetov, Zhanar Azeshova // Proceedings of SPIE. Volume 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018; 1104512 (2019).
191. Микитенко В.І. Узгодження діаметрів вхідних зіниць дзеркально-лінзового об'єктиву двоканальної ОЕСС [Текст] / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2011. - Вип. 42. - С.54 – 61.
192. Vollmerhausen R.H. The Targeting Task Performance Metric: A New Model for Predicting Target Acquisition Performance [Текст] / Vollmerhausen R.H., Jacobs E. - Technical Report, AMSEL-NV-TR-230, US Army CERDEC, Fort Belvoir. VA 22060, 2003.

193. Сенаторов Н.В. Модели параллактической ошибки линзового моноблочного коллиматорного прицела [Текст] / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2004.- №1(10). - С.34-36.
194. Микитенко В.И. Модели параллактической ошибки коллиматорного прицела на базе сферического зеркала со смещенной геометрической осью [Текст] / Микитенко В.И., Сенаторов Н.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003. - Вып. 9. - С.20-24.
195. Турыгин И.А. Прикладная оптика [Текст] / Турыгин И.А. - М.: Машиностроение, 1966. - 432 с.
196. Сенаторов Н.В. Применение голографического оптического элемента при создании малогабаритных коллиматорных прицелов [Текст] / Сенаторов Н.В., Полежаев В.В., Микитенко В.И., Сенаторов В.Н. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический журнал - Киев: НТЦ АСВ.- 2008.- №3(28). – С.27-34.
197. Сенаторов Н.В. Оптические прицелы для стрелкового оружия [Текст] / Сенаторов Н.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Междунар. науч.-техн. сб.- Киев: НТЦ АСВ.- 2001.- Вып. 3. - С. 91 – 94.
198. Сенаторов Н.В. Моноблочный телескопический визир малого увеличения [Текст] / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія приладобудування.- 2004. – Вип. 27. – С. 50 -55.
199. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем [Текст] / Слюсарев Г.Г. - Л.: Машиностроение. – 1969. - 670 с.
200. Фефилов Б.В. Задачник по прикладной оптике [Текст] / Фефилов Б.В. - М.:Высшая школа. – 1974. - 160 с.
201. Трубка С.В. Расчёт двухлинзовых склеенных объективов. Справочник [Текст] / Трубка С.В. - Л.: Машиностроение. – 1984. - 142 с.

202. Агапов Н.А. Практикум по автоматизации проектирования оптико-механических приборов [Текст] / Агапов Н.А., Ашихмин В.Н., Богданов В.Ф. и др. - М.: Машиностроение. – 1989. - 271 с.
203. Сенаторов Н.В. Моноблочный телескопический визир малого увеличения [Текст] / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. // III науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (20 - 21 квітня 2004 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2004. - С.54-55.
204. Голуб Ю.Н. Пистолет «Форт-12» [Текст] / Голуб Ю.Н., Большаков В.Н. // Специальная техника и вооружение.- Науч.-метод. изд. – Киев: ОАО «Укрспецтехника». -2001. – № 2. – С. 33 – 34.
205. Микитенко В.І. Використання об'єктивів змінного збільшення в двоканальних ОЕСС [Текст] / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (28-29 квітня 2009 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2009. - С. 43.
206. Микитенко В.І. Оптико-електронна система спостереження для наземної техніки [Текст] / Микитенко В.І., Пашков Р.А. // XI науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (15-16 травня 2018 р.). Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2018. - С. 159 - 162.
207. Микитенко В.І. Модернізація авіаційного стрілецького прицілу комплексуванням інформаційних каналів [Текст] / Микитенко В.І., Сенаторов М.В. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.- 2010. - Вип. 40. - С.86 - 93.
208. Лазарев Л.П. Оптико-электронные приборы наведения / Лазарев Л.П. - М.: Машиностроение, 1989.- 760 с.
209. Черняк С.І. Авіаційний індикатор на лобовому склі ІЛС-39 [Текст] / Черняк С.І., Денисов М.Л., Волчанецький К.Ю. та ін. // Вісник НТУУ «КПІ», серія Приладобудування. - 2008.- Вип. 35. - С. 16-19.

210. Волосов Д.С. Фотографическая оптика [Текст] / Волосов Д.С. - М.: Искусство, 1971. – 670 с.
211. Колобродов В.Г. Стендовая аппаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування [Текст] / Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Міхеєнко Л.А. // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2003. - №3(29). – С. 98 – 104.
212. Міхеєнко Л.А. Стендовая аппаратура для измерения энергетических характеристик сканирующих устройств космического базирования [Текст] / Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. // Перша науково-технічна конференція «Приладобудування 2002: підсумки і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2002. - С.52.
213. Колобродов В.Г. Установка для аттестации космических систем зондирования Земли [Текст] / Колобродов В.Г., Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. // II науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22 – 23 квітня 2003 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2003. - С.34-35.
214. ГОСТ 17616-80. Лампы электрические. Методы измерения электрических и световых параметров. - Введ. 02.09.1982. – М.: Гос.ком. СССР по стандартам, 1982. – 49 с.
215. ГОСТ 8.195-89. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности энергетической яркости в диапазоне длин волн 0,2-2,5 мкм, спектральной плотности силы излучения и спектральной плотности энергетической освещенности в диапазоне длин волн 0,2-2,5 мкм. - Введ. 02.02.1989. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1982. – 11 с.
216. Barker J.I. Prelaunch absolute radiometric calibration of the reflective bands on the Landsat 4 prototype thematic mapper [Текст] / Barker J.I., Ball D.I., Leung K.C., Walker J.A. - Nasa Coddard Space Flight Center, 1984. – 97 p.
217. Dinguirard M. Dispositif d'etalonnage sur le soleil la camera HRV du projet SPOT [Текст] / Dinguirard M., Maisonneuve J.M. // Passegna Internazionale Elettronica Nucleare ed aerospaziale (Rome, Italy, mar 7-16, 1980). - P.1173-1180.

218. Norwood V.I. Electro-optical imaging sensors [Текст] / Norwood V.I., Lansing J.C. // American Society of Photogrammetry.- 1983.- P.367-372.
219. ГОСТ 10771-88. Лампы накаливания светоизмерительные рабочие. Технические условия. - Введ. 01.01.1983. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. – 21 с.
220. Kastner C.I. In-flight radiometric calibration of advanced [Текст] / Kastner C.I., Slater P.N. // Proc SPIE.-1982.- vol.356. - P.358-465.
221. Курейчик К.П. Источник питания ламп с полым катодом [Текст] / Курейчик К.П., Макаров В.Л., Мавлютов М.М. // Приборы и техника эксперимента.- 1985.- №2.- С.188-190.
222. Вариченко Л.В. Методы и средства измерения энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли [Текст] / Вариченко Л.В., Колобродов В.Г., Ладыка Я.Е., Микитенко В.И., Михеенко Л.А. // Космічна наука і технологія. - 2006. - т.12, №2/3. - С.59-69.
223. Колобродов В.Г. Особенности измерения энергетических характеристик космических оптико-электронных сканеров [Текст] / Колобродов В.Г., Михеенко Л.А., Микитенко В.И. // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (20-21 квітня 2004 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2004. - С.55-56.
224. Космическая система «Ресурс» для исследования природных ресурсов Земли и контроля окружающей среды [Текст] / Под ред. Гусева Л.И. -М.: Главкосмос, 1988. – 294 с.
225. Сахновский М.Ю. О возможностях использования интегрального шарового фотометра в измерениях диффузного отражения по абсолютной методике [Текст] / Сахновский М.Ю. // Оптика и спектроскопия.- 1987.- Т.62.-Вып 3.- С.692-697.
226. Каталог светорассеивающих стекол (оптических) [Текст].- Л.: ГОИ, 1975.- 57с.
227. Михайлов О.М. Неселективный отражатель из молочного стекла [Текст] / Михайлов О.М. // Оптика и спектроскопия.- 1970.- Т.28.- Вып.4.- С.801-802.

228. Кувалдин Э.В., Борисов В.А. Основные характеристики и методы испытаний измерительных фотодиодов [Текст] / Кувалдин Э.В., Борисов В.А. // Импульсная фотометрия.- 1984.- Вып.8. - С.71-81.
229. Мартынюк А.С. Метрологические характеристики кремниевых фотодиодов. Методы точных измерений лазерного излучения [Текст] / Мартынюк А.С. // Сб. тр. ВНИИФПРИ.- М.: 1985.- С.55-62.
230. Бирюков А.Г., Маслов В.А., Медведев В.И. Цифровой прямопоказывающий импульсный фотометр малых энергий с автоматическим выбором диапазона измерений [Текст] / Бирюков А.Г., Маслов В.А., Медведев В.И. // Импульсная фотометрия.- 1981.- Вып.7.- С.92-95.
231. Колобродов В.Г. Метрологическое обеспечение энергетической аттестации оптикоэлектронных систем зондирования Земли [Текст] / Колобродов В.Г., Михеенко Л.А., Микитенко В.И. // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (26-27 квітня 2005 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2005. - С.54.
232. ГОСТ 17333-80. Приборы фотоэлектронные. Методы измерения спектральной чувствительности. - Введ. 01.07.1981. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 8 с.
233. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике [Текст] / Выгодский М. Я. – М.: Наука. – 1978. – 336 с.
234. Гуревич М. М. Введение в фотометрию [Текст] / Гуревич М. М. – Л.: Энергия, 1968. – 285 с.
235. ГОСТ 17772 – 88. Требования к измерительной аппаратуре при измерении характеристик фотоэлектронных приёмников излучения. - Введ. 29.06.1988. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. – 65 с.
236. Михеенко Л.А. Энергетическая калибровка многоспектральных сканирующих устройств высокого разрешения [Текст] / Михеенко Л.А., Микитенко В.И. // Космічна наука і технологія. - 2009. - т.15, №3. - С.42-49.
237. Горелов В.А. Состояние и тенденции развития космических средств дистанционного зондирования высокого разрешения [Текст] / Горелов В.А.,

- Лукашевич Е.Л., Стрельцов В.А. // ГИС – Ассоциация. Информационный бюллетень. – 2002. - № 5 (37). – С. 7-12, 43-45.
238. Міхеєнко Л.А. Патент на винахід 78609 Україна, МПК G01J1/10, F21V 9/00. Дифузний випромінювач / Міхеєнко Л.А., Колобродов В.Г., Микитенко В. І., Петрущенко Л.А., Гайворонська Г.О.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». - №а200504103; заявл. 28.04.2005; опубл. 10.04.2007, бюл. №4.
239. Міхеєнко Л.А. Радіометричне калібрування прецизійних оптико-електронних зондуючих систем космічного базування: дис. доктора техн. наук: 05.11.07 [Текст] / Міхеєнко Леонід Андрійович. – К., 2013. – 368 с.
240. Мухамедяров Р.Д. Метрологическая аттестация многоспектрального сканирующего устройства высокого разрешения [Текст] / Мухамедяров Р.Д., Глушков А.С. и др. // Исслед. Земли из космоса. – 1991. – №1. – С. 64 – 74.
241. Кисилёв И. А. Контроль энергетических характеристик многозональных сканирующих устройств ИСЗ «Ресурс-01» [Текст] / Кисилёв И. А., Коростелев А. Н., Караева М. К. и др. // Исследования Земли из космоса. – 1991. – № 2. – С. 34 – 43.
242. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. - Введ. 01.01.1977. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1976. – 8 с.
243. Микитенко В.І. Стратегія комплексування відео зображень [Текст] / Микитенко В.І. // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (27-28 квітня 2010 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2010. - С.61 - 62.
244. Rybalko M. A new approach to information fusion in optoelectronic surveillance systems [Текст] / Rybalko M., Mykytenko V. // 11-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2010 (October 21-24). - Kyiv, 2010.
245. Zhong Zhang. Multisensor Image Fusion Using a Region-Based Wavelet Transform Approach [Текст] / Zhong Zhang and Rick S. Blum. // Proc. DARPA Image Understanding Workshop (IUW). – 1997. – P. 1447-1451.

246. Gueziec A., Pennec X., Ayache N. Medical Image Registration Using Geometric Hashing [Текст] / Gueziec A., Pennec X., Ayache N. // IEEE Computational Science and Eng., 1997. - Vol. 4. - № 4. - P. 29-41.
247. Manjunath B.S. A Contour-Based Approach to Multisensor Image Registration [Текст] / Manjunath B.S., Mitra S.K. // IEEE Trans. Image Processing, 1995.- vol. 4, № 3.- P. 320-334,.
248. Мосягин Г.М. Теория оптико-электронных систем: Учеб. для студентов вузов для оптических специальностей [Текст] / Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. - М.: Машиностроение, 1990. – 432 с.
249. Wells W.M. Multimodal Volume Registration by Maximization of Mutual Information [Текст] / Wells W.M., Viola P., Atsumi H., etc. // Medical Image Analysis, 1996. - vol. 1. -№1.- P. 35-51.
250. He Y. A Generalized Divergence Measure for Robust Image Registration [Текст] / He Y., Ben-Hamza A., Krim H. // IEEE Trans. Signal Processing, 2003. -vol. 51. - №5. - P. 1211-1220.
251. Микитенко В.И. Моделирование и разработка многоканальных средств диагностики состояния человека на основе анализа его инфракрасного излучения [Текст] / Микитенко В.И. // Матеріали за 10-а міжнародна научна практична конференція «Динаміката на сьвременната наука». Том 11. Технологии. «Бял ГРАД-БГ» ООД. - София, 2014. - С.49 - 53.
252. Котовський В.Й. Використання багатоканальних оптико-електронних систем для дослідження біологічних об'єктів [Текст] / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Електроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». - 2009. - Ч.1 - №2-3. - С.187 – 190.
253. Микитенко В.І. Дистанційні спостереження в тумані з допомогою пасивних двокаанальних іконічних оптико-електронних систем [Текст] / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2008. - Вип. 35. - С.29 - 36.
254. Микитенко В.І. Комплексування зображень при денних дистанційних спостереженнях [Текст] / Микитенко В.І. // VII Міжнародна науково-технічна

конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22-23 квітня 2008 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2008. - С.66.

255. Кабанов М.В. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок [Текст] / Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. - Новосибирск: Наука, Сиб.отд., 1988. – 201 с.

256. Котовський В.Й. Багатоканальні системи технічного зору для дистанційного енергоаудиту складних об'єктів [Текст] / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Вісті академії інженерних наук України. - 2008. - №2(36). - С.16 - 19.

257. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection [Текст] / Canny, John. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986. - Vol. PAMI-8, No. 6.- P. 679-698.

258. Микитенко В.И. Стратегия комплексирования информации в двухканальных оптико-электронных системах наблюдения с разными полями зрения [Текст] / Микитенко В.И., Рибалко М.С. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2011. - №1(38). - С.19-23.

259. Мамута М.С. Спосіб комплексування в двоканальних іконічних системах / Мамута М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. // Патент на корисну модель №82581, МПК G06T 5/50 (2006.01). Заявлено 21.03.2013; Опубл. 12.08.2013, Бюл. №15, 2013 р.

260. Плотніков О.М. Метод комплексування даних з попереднім знаходженням інформативної області сцени [Текст] / Плотніков О.М., Микитенко В.І. // Вісник Хмельницького національного університету. - 2017. -№1(245). - С.196 - 201.

261. Harel J. Graph-Based Visual Saliency [Текст] / Harel J., Koch C., та Perona P. // NIPS'06 Proceedings of the 19th International Conference on Neural Information Processing Systems, December 04 - 07, 2006. - P. 545-552.

262. Плотніков О.М. Імплементация багатоспектральних ОЕСС на FPGA [Текст] / Плотніков О.М., Микитенко В.І. // X науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування». Збірник

тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2017. - С. 40.

263. Kolobrodov V.G. Physical and mathematical model of the digital coherent optical spectrum analyzer [Текст] / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchyk, V.I. Mykytenko, M.S. Kolobrodov // *Optica Applicata*. - 2017. - (Vol.47), No.2. - P.273-282.

264. Zenkova C. Yu. Use of motion peculiarities of test particles for estimating degree of coherence of optical fields [Текст] / Zenkova C. Yu., Gorsky M. P., Soltys I. V. and Angelsky P. O. // *Ukr. J. Phys. Opt.* 13. - P.183 – 195.

265. Колобродов В.Г. Геометрична смуга пропускання оптичного спектроаналізатора [Текст] / Колобродов В.Г., Тимчик Г.С., Колобродов М.С. // Інформаційні системи і технології. Математичне моделювання. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2015, №5. – С. 50–55.

266. Curatu G. Analysis and design of wide-angle foveated optical systems based on transmissive liquid crystal spatial light modulators [Текст] / Curatu G., Harvey J. E. // *Optical Engineering*. – 2009. – Vol. 48(4). – P. 043001-1–043001-11.

267. Kolobrodov V. H. Influence of the Matrix Structure of the Modulator and Detector on the Optical Spectrum Analyzer Output Signal [Текст] / Kolobrodov, V. H., Tymchik, G. S., Mykytenko, V. I., Kolobrodov, M. S., Lutsiuk, M. M. // *Visnyk NTUU KPI Serii A. Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. – 2018. - Iss. 72. - P.78 -85.

268. Микитенко В.І. Покращення роздільної здатності зображення при дистанційному спостереженні земної поверхні з рухомої платформи [Текст] / Микитенко В.І., Рибалка М.С. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С.54 - 55.

269. Добровольська К.В. Підвищення просторової роздільної здатності космічних мікроболометричних камер [Текст] / Добровольська К.В., Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Тягур В.М. // Київ: «Вік принт», 2018. - 223 с.

270. Микитенко В.І. Покращення роздільної здатності зображень при дистанційному спостереженні Землі в умовах вібрацій [Текст] / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Перша студентська науково-технічна конференція

«Приладобудування: стан і перспективи» (23 квітня 2008 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2008. - С.18.

271. Микитенко В.І. Підвищення просторового розділення оптико-електронної системи спостереження за рахунок коливань платформи [Текст] / Микитенко В.І. // Перша Всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (3-5 червня 2008 р.). Збірник тез доповідей / КП СПБ «Арсенал». - Київ, 2008. - С.45 - 46.

272. Микитенко В.І. Підвищення роздільної здатності зображень, спотворених лінійним рівномірним рухом [Текст] / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2008. - Вип. 36. - С.24 - 30.

ДОДАТОК А

ДОКУМЕНТИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор-Головний конструктор
КП СПБ «Арсенал»,
член-кор. НАН України, д.т.н.,

 М.І. Лихосвіт
«__» _____ 2019 року



АКТ

використання результатів досліджень дисертаційної роботи Микитенка В.І.
«Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем
спостереження з комплексуванням зображень»

Комісія Казенного підприємства спеціального приладобудування «Арсенал» у складі: голови комісії – головного конструктора ОЕС космічного призначення, к.т.н. Тягура В. М. і членів комісії - провідного інженера, к.ф.-м.н. Ключко О. І. та інженера-конструктора 1 кат., к.т.н. Позднякова Д.В. розглянула матеріали дисертаційної роботи Микитенка В.І. «Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень» і зробила висновок, що результати роботи, а саме

- математична модель системи «об'єкт – атмосфера – об'єктив – мікроболометрична матриця – електронний блок обробки і передачі відеосигналу»;

- метод розрахунку просторового та енергетичного розділення космічних оптико-електронних систем спостереження на похилих трасах спостереження;

- метод узгодження характеристик об'єктивів двоканальних оптико-електронних систем спостереження на основі критерію успішності виконання задачі ТТР;

- схема та розрахункова модель установки для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних систем спостереження на базі дифузного освітлювача зі змінною яскравістю

були використані при проектуванні та виготовленні оптико-електронних систем дистанційного спостереження по контрактах КП СПБ «Арсенал» і КП Ім. Ігоря Сікорського №02/02-5 (шифр МС-2-8) «Дослідження критеріїв оцінки просторового розділення телевізійних систем спостереження», №117056 «Критерії якості зображення в космічних сканерах високого розділення», №453/4 «Розробка методик розрахунку просторового і енергетичного

розділення ІЧ камери космічного базування з мікроболометричною матрицею», в яких дисертант брав безпосередню участь.


Використання цих технічних рішень дозволяє підвищити ефективність дистанційних спостережень та покращити метрологічні характеристики вимірювальних стендів для атестації оптико-електронних систем спостереження.

Голова комісії:

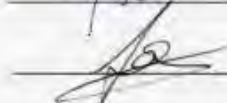


В.М. Тягур

Члени комісії:



О.І. Клочко



Д.В. Поздняков

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ДП «ІНІТ» «Квант»

Петроженцев В.В.

2019 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Микитенка В.І.
«Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем
спостереження з комплексуванням зображень»

Комісія у складі:

Голова комісії: перший заступник директора з наукової роботи
Стефанович В.Т.

Члени комісії: начальник НДВ-1 – начальник відділу 33
Петруша О.О.
начальник відділу 40
Ліждвой О.Є.
головний науковий співробітник відділу 33
Русняк І.М.

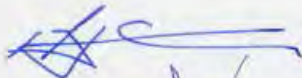
розглянула матеріали дисертаційної роботи Микитенка В.І. «Підвищення
ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з
комплексуванням зображень».

Комісія встановила, що запропоновані автором дисертаційної роботи
науково-технічні рішення щодо моделювання системи «ціль – ІЧ система
спостереження – оператор», алгоритмів обробки сигналів ІЧ датчика
використані Державним підприємством «Науково-дослідний інститут
«Квант» при розробці оптико-електронної системи спостереження та
розвідки, шифр «Селена», в рамках виконання технічного проекту складової

частини дослідно-конструкторської роботи, шифр «Селена-Ц» (договір № 1030-К від 30.09.2008 р.).

Даний акт не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Голова комісії:



В.Т. Стефанович

Члени комісії:



О.О. Петруша



О.Є. Ліждвой



І.М. Русняк

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Центрального Науково-дослідного
інституту озброєння та військової техніки
Збройних Сил України

Заслужений діяч науки і техніки України,
Лауреат державної премії України в галузі
науки і техніки, доктор технічних наук,
професор, генерал-майор



І.ЧЕПКОВ

« » 24.09.2019 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Микитенка В.І.
«Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем
спостереження з комплексуванням зображень»

Комісія у складі голови комісії – д.т.н., професора Лапицького С.В. та
членів комісії – к.т.н., доцента Сенаторова В.М. і к.т.н. Гусякова О.М.
встановила наступне.

1. Результати вказаної дисертаційної роботи використані при виконанні
науково-дослідної роботи «Тайпан»: «Розробка проекту Концепції
оснащення військових частин підрозділів Збройних Сил України наземними
робототехнічними комплексами на період до 2025 р.», ДР №0118U000125д.
Зокрема наступні результати дисертаційної роботи В.І.Микитенка:

- запропоновані схемні та технічні рішення побудови оптико-електронної
системи спостереження та розвідки;
- алгоритми обробки сигналів датчиків, які входять в комплекс,
використані при обґрунтуванні перспективного обрису наземних
робототехнічних комплексів.

2. Огляд сучасного стану розробки оптико-електронних систем
спостереження використано в НДР «Аргумент»: «Аналіз тенденцій розвитку
основних засобів збройної боротьби провідних країн світу та їх вплив на
розвиток систем озброєння Збройних Сил України», ДР №0119U0000911д.

Даний акт не є підставою для взаємних фінансових розрахунків.

Голова комісії:

С.ЛАПИЦЬКИЙ

Члени комісії:

В.СЕНАТОРОВ
О.ГУСЛЯКОВ

Затверджую

Декан приладобудівного факультету
Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Г. С. Тимчик

" 18 " 09 2018 р.

АКТ

використання результатів дисертаційної роботи Микитенка В.І.

«Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з
комплексуванням зображень» в навчальному процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського

Ми, що підписалися нижче, заступник декана з методичної роботи к.т.н., доцент Філіппова М.В., завідувач кафедри оптичних та оптико-електронних приладів, д.т.н., професор Колобродов В.Г., професор кафедри оптичних та оптико-електронних приладів, д.т.н., професор Чиж І.Г., вчений секретар кафедри оптичних та оптико-електронних приладів, к.ф.-м.н., доцент Богатирьова Г.В. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи к.т.н., доцента кафедри Микитенка В.І. на тему «Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень» використовуються в навчальному процесі при підготовці фахівців за спеціальностями 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. В лекціях та практичних заняттях з навчальних дисциплін «Космічні та авіаційні оптико-електронні прилади», «Проектування інфрачервоних сенсорів» використані наступні науково-технічні результати дисертаційної роботи:

- методологічні основи габаритного й енергетичного розрахунків багатоспектральних оптико-електронних систем дистанційного спостереження, а також методи узгодження параметрів їх вхідних оптичних блоків;
- моделі вхідних сигналів та методи дослідження інформаційної системи для визначення ймовірнісних характеристик виявлення об'єктів з допомогою телевізійних та тепловізійних систем;
- методи оцінювання ефективності роботи багатоканальних оптико-електронних систем спостереження.

Використання студентами результатів дисертаційної роботи Микитенка В.І. дозволяє їм більш глибоко опанувати сучасні технології проектування оптико-електронних систем, виконувати курсові проекти, магістерські дисертації на більш високому науково-технічному рівні.

Заступник декана з
методичної роботи

Завідувач кафедри ООЕП

Професор кафедри ООЕП

Вчений секретар кафедри ООЕП

Філіппова М.В.

Колобродов В.Г.

Чиж І.Г.

Богатирьова Г.В.

ДОДАТОК Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основні публікації

1. Микитенко В.І. Комплексування інформації в багатоканальних оптико-електронних системах спостереження: монографія / Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Поліграфічний центр «Аверс», Київ, 2013. – 178 с.
2. Микитенко В.І. Ефективність інфрачервоних оптико-електронних систем спостереження: монографія / В.Г. Колобродов, В.І. Микитенко, Є.Г. Балінський // Київ: «Вік прінт», 2017. - 202 с.
3. Микитенко В.І. Оптические системы видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли / Колобродов В.Г., Бородийчук П.В., Микитенко В.І. // Космічна наука і технологія. - 1998. - т.4, №1. - С.29-38. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar).
4. Микитенко В.І. Классификация и методика сопоставительного анализа оптических схем коллиматорных прицелов / Сенаторов Н.В., Микитенко В.І. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003. - Вып. 7. - С.8-12. (Наукове фахове видання України з технічних наук).
5. Микитенко В.І. Оптимизация конструкции моноблочного коллиматорного прицела / Микитенко В.І., Сенаторов Н.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003.- Вып. 8. - С.27-29. (Наукове фахове видання України з технічних наук).
6. Микитенко В.І. Модели параллактической ошибки коллиматорного прицела на базе сферического зеркала со смещенной геометрической осью / Микитенко В.І., Сенаторов Н.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2003. - Вып. 9. - С.20-24. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

7. Микитенко В.І. Стендова апаратура для вимірювання енергетичних характеристик оптико-електронних пристроїв космічного базування / Колобродов В. Г., Микитенко В.І., Л.А. Міхеєнко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». -2003. - №3. -С. 98 - 104. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

8. Микитенко В.И. Модели параллактической ошибки линзового моноблочного коллиматорного прицела / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2004.- №1(10). - С.34-36. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

9. Микитенко В.И. Моноблочный телескопический визир малого увеличения / Сенаторов Н.В., Микитенко В.И. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.- 2004. - Вип. 27. - С. 50 -55. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, PИНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

10. Микитенко В.И. Полунатурная модель цели для определения исходных данных стрельбы из стрелкового оружия / Сенаторов Н.В., Лагно Ю.В., Микитенко В.И., Гурнович А.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2004.- №2(11). - С.35-37. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

11. Микитенко В.И. Сопоставительный анализ телескопических прицелов для стрелкового оружия / Гурнович А.В., Сенаторов Н.В., Колобродов В.Г., Микитенко В.И. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический журнал. - 2004.- №3(12). – С.35-41. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

12. Микитенко В.И. Оценка эффективности выполнения боевой задачи оператором стрелкового оружия с оптическим прицелом / Сенаторов Н.В., Гурнович А.В., Микитенко В.И., Лагно Ю.В. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2005. - №1(14). - С.4-7. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

13. Микитенко В.І. Комплексування інформації в оглядово-візирних

системах керованих рухомих об'єктів / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2005. - Вип. 30. - С. 36 - 41. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

14. Микитенко В.І. Методы и средства измерения энергетических характеристик оптико-электронных систем космического зондирования Земли / Вариченко Л.В., Колобродов В.Г., Ладыка Я.Е., Микитенко В.І., Михеенко Л.А. // Космічна наука і технологія. - 2006. - т.12, №2/3. - С.59-69. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar).

15. Микитенко В.І. Дослідження релевантних ознак зображень в ОЕП телевізійного типу / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2006. - Вип. 31. - С. 24 - 31. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

16. Микитенко В.І. Моделювання зображення у задачах комплексування каналів оптико-електронних систем / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2007. - Вип. 33. - С. 24 - 29. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

17. Микитенко В.І. Багатоканальні іконічні системи дистанційного моніторингу / Богатирьова Г.В., Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Вісті академії інженерних наук України. - 2007. - №2(32). - С.21 - 26. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

18. Микитенко В.І. Тенденції розвитку космічних оптико-електронних систем спостереження Землі / Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2007. - №3. - С.115-120. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

19. Микитенко В.І. Вибір показника якості в багатоканальних бортових оглядово-пошукових оптико-електронних системах / Микитенко В.І. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2007. - Вип. 34. - С.40 - 45. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

20. Микитенко В.И. Исследование тепловой составляющей окислительно-восстановительных процессов методом динамической термографии / Котовський В.Й., Микитенко В.И. // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники»*. - 2008. - Ч.2 - №3-4. - С.93 - 95. (Видання індексується в наукометричних базах COPE, CrossRef, IC Journals Master List, BASE, Google Scholar, OpenAIRE, PBN, SIS, WorldCat).

21. Микитенко В.І. Багатоканальні системи технічного зору для дистанційного енергоаудиту складних об'єктів / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // *Вісті академії інженерних наук України*. - 2008. - №2(36). - С.16 - 19. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

22. Микитенко В.І. Дистанційні спостереження в тумані з допомогою пасивних двоканальних іконічних оптико-електронних систем / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*. - 2008. - Вип. 35. - С.29 - 36. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

23. Микитенко В.І. Комплексування зображень в багатоканальних оптико-електронних системах з різноформатними матричними приймачами випромінювання / Микитенко В.І., Котовський В.Й. // *Вісті академії інженерних наук України*. - 2008. - №3 (37). - С.38 - 44. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

24. Микитенко В.И. Применение голографического оптического элемента при создании малогабаритных коллиматорных прицелов / Сенаторов Н.В., Полежаев В.В., Микитенко В.И., Сенаторов В.Н. // *Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический журнал*. - 2008.- №3(28). - С.27-34. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

25. Микитенко В.І. Підвищення роздільної здатності зображень, спотворених лінійним рівномірним рухом / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*. - 2008. - Вип. 36. - С.24 - 30. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

26. Микитенко В.І. Вибір оптико-електронної системи малорозмірного

університетського супутника / Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., Марченко В.О., Микитенко В.І. // Вісник ЧДТУ. - 2008. - №2. - С. 167 - 172. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Academic Resource Index, WorldCat, CrossRef, Ulrich's Periodicals Directory).

27. Микитенко В.І. Використання багатоканальних оптико-електронних систем для дослідження біологічних об'єктів / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // Електроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». - 2009. - Ч.1 - №2-3. - С.187 – 190. (Видання індексується в наукометричних базах COPE, CrossRef, IC Journals Master List, BASE, Google Scholar, OpenAIRE, PBN, SIS, WorldCat).

28. Микитенко В.І. Энергетическая калибровка многоспектральных сканирующих устройств высокого разрешения / Михеенко Л.А., Микитенко В.І. // Космічна наука і технологія. - 2009. - т.15, №3. - С.42-49. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, Crossref, OJS, Google Scholar).

29. Микитенко В.І. Модернізація авіаційного стрілецького прицілу комплексуванням інформаційних каналів / Микитенко В.І., Сенаторов М.В. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування.- 2010. - Вип. 40. - С.86 - 93. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

30. Микитенко В.І. Стратегия комплексирования информации в двухканальных оптико-электронных системах наблюдения с разными полями зрения / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Артиллерийское и стрелковое вооружение: Международный научно-технический сборник. - 2011. - №1(38). - С.19-23. (Наукове фахове видання України з технічних наук).

31. Микитенко В.І. Узгодження діаметрів вхідних зіниць дзеркально-лінзового об'єктиву двоканальної ОЕСС / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2011. - Вип. 42. - С.54 – 61. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

32. Микитенко В.І. Підвищення ефективності роботи тепловізійної системи

при спостереженні малорозмірних цілей на морському фоні / Микитенко В.І., Подрига С.І. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2011. - №2(38). С.56 – 59. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, Index Copernicus).

33. Микитенко В.І. Оцінка показників якості комплексованих зображень в двоканальних ОЕСС / Рибалко М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. // Вісник ЧДТУ. - 2011. - №4. - С.57 - 62. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, Academic Resource Index, WorldCat, CrossRef, Ulrich's Directory).

34. Микитенко В.І. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації / Колобродов В.Г., Мамута М.С., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2012. - №6(86). - С.127 - 131. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

35. Микитенко В.І. Удосконалення розрахунку мінімальної роздільної різниці температур медичного тепловізора / А.М.Л. Аль-Мзіраві, Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2014. - №5 (97). - С.96 - 100. (Видання індексується в наукометричних базах WorldCat, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus).

36. Микитенко В.І. Комплексування зображень у цілодобових двоканальних системах спостереження / Микитенко В.І., Балтабаєв М. М., Пономаренко О. А. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. - 2014. – Вип. 48. – С. 43 – 49. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

37. Микитенко В.И. Расчет минимальной разрешаемой разности температур тепловизионных приборов / Ахмед М.Л. Аль-Мзирави, Колобродов В.Г., Микитенко В.И. // Приборы и методы измерений. - 2015 г., № 1(10). - С.64 - 69. (Іноземне видання).

38. Микитенко В.І. Метод комплексування даних з попереднім знаходженням інформативної області сцени / Плотніков О.М., Микитенко В.І. // Вісник Хмельницького національного університету. - 2017. -№1(245). - С.196

- 201. (Видання індексується в наукометричних базах Google Scholar, Index Copernicus, eLibrary.ru, Polish Scholarly Bibliography).

39. Mykytenko V. I. Calculation Model for Optoelectronic Remote Sensing System's Radiometric Resolution at Arbitrary Viewing Angles / Kolobrodov, V. H., Lykholit, M. I., Mykytenko, V. I., Tiagur, V. M., Dobrovolska, K. V. // Visnyk NTUU KPI. Serii Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. - 2017. - Iss. 69. - PP.30-34. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).

40. Mykytenko V.I. Physical and mathematical model of the digital coherent optical spectrum analyzer / V.G. Kolobrodov, G.S. Tymchyk, V.I. Mykytenko, M.S. Kolobrodov // Optica Applicata. - 2017. - (Vol.47), No.2. - PP.273-282. (Іноземне видання).

41. Mykytenko V. I. Influence of the Matrix Structure of the Modulator and Detector on the Optical Spectrum Analyzer Output Signal / Kolobrodov, V. H., Tymchik, G. S., Mykytenko, V. I., Kolobrodov, M. S., Lutsiuk, M. M. // Visnyk NTUU KPI Serii Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia. – 2018. - Iss. 72. - PP.78-85. (Видання індексується в наукометричних базах Web of Science, WorldCat, OpenAIRE, DOAJ).

42. Микитенко В.І. Порівняння якості роботи фільтрів для зменшення шумів зображень тепловізійного каналу оглядових оптико-електронних пристроїв / Балахонова Н. О., Микитенко В. І., Пашков Р. А. // Вісник КПІ. Серія приладобудування. - 2019. - Вип. 57(1). - С.26 – 35. (Видання індексується в наукометричних базах Index Copernicus, РІНЦ, BASE, WorldCat, OpenAIRE).

Патенти

43. Микитенко В. І. Патент на винахід 78609 Україна, МПК G01J1/10, F21V 9/00. Дифузний випромінювач / Міхеєнко Л.А., Колобродов В.Г., Микитенко В. І., Петрущенко Л.А., Гайворонська Г.О.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». - №а200504103; заявл. 28.04.2005; опубл. 10.04.2007, бюл. №4.

44. Микитенко В.І. Патент на корисну модель №82581, МПК G06T 5/50 (2006.01) / Спосіб комплексування в двоканальних іконічних системах /

Мамута М.С., Микитенко В.І., Мамута О.Д. // Заявлено 21.03.2013; Опубл. 12.08.2013, Бюл. №15, 2013 р.

Матеріали конференцій

45. Mykytenko V. I. Refinement of thermal imager minimum resolvable temperature difference calculating method / Mykytenko V. I., Kolobrodov V. G. // Proc. SPIE 9809, Twelfth International Conference on Correlation Optics, 98090C (November 30, 2015); doi:10.1117/12.2228532.

46. Mykytenko V. I. Spaceborne linear array imager's spatial resolution for arbitrary viewing angles / Valentin G. Kolobrodov; Catherine V. Dobrovolska; Volodymyr I. Mykytenko; Grygorij S. Tymchik; Volodymyr M. Tiagur; Paweł Komada; Assel Mussabekova; Aliya Targeusizova; Aigul Iskakova // Proceedings of SPIE V. 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High Energy Physics Experiments 2017; 104450J (2017); doi: 10.1117/12.2280909.

47. Mykytenko V. I. Substantiation of a university nanosatellite television camera parameters / Valentin Kolobrodov, Volodymyr Mykytenko, Vyacheslav Sokurenko, Andrzej Smolarz, Assel Mussabekova, Samat Sundetov, Zhanar Azeshova // Proceedings of SPIE. Volume 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018; 1104512 (2019); doi: 10.1117/12.2522404. (Закордонне видання, індексується в наукометричних базах Web of Science, Scopus, Ei Compendex, Inspec, Google Scholar, Astrophysical Data System (ADS), CrossRef).

48. Mykytenko V. I. University Nanosatellite Television Camera / V. Mykytenko, V. Kolobrodov, O. Lysenko, V. Sokurenko // IEEE Conference Proceedings. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). - Kyiv, 2019. - PP. 543-547.

49. Микитенко В.І. Стендовая аппаратура для измерения энергетических характеристик сканирующих устройств космического базирования / Міхеєнко Л.А., Микитенко В.І. // Перша науково-технічна конференція «Приладобудування 2002: підсумки і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2002. - С.52.

50. Микитенко В.І. Установка для аттестации космических систем зондирования Земли / Колобродов В.Г., Михеєнко Л.А., Микитенко В.І. // II науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22 – 23 квітня 2003 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2003. - С.34-35.

51. Микитенко В.І. Моделирование работы оператора в поисково-прицельных оптических и оптико-электронных системах / Микитенко В.І. // II науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22–23 квітня 2003 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2003. - С.55.

52. Микитенко В.І. Моноблочный телескопический визир малого увеличения / Сенаторов Н.В., Микитенко В.І. // III науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (20 - 21 квітня 2004 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2004. - С.54-55.

53. Микитенко В.І. Особенности измерения энергетических характеристик космических оптико-электронных сканеров / Колобродов В.Г., Михеєнко Л.А., Микитенко В.І. // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (20-21 квітня 2004 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2004. - С.55-56.

54. Микитенко В.І. Метрологическое обеспечение энергетической аттестации оптикоэлектронных систем зондирования Земли / Колобродов В.Г., Михеєнко Л.А., Микитенко В.І. // IV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (26-27 квітня 2005 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2005. - С.54.

55. Микитенко В.І. Анализ задач визуального поиска и распознавания / Микитенко В.І. // V Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (25-26 квітня 2006 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2006. - С.78-79.

56. Микитенко В.І. Оцінка якості комплексування зображень в багатоканальних оптико-електронних системах / Микитенко В.І. // V Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (25–26 квітня 2006 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2006. - С.79-80.

57. Микитенко В.І. Покращення роздільної здатності зображення при дистанційному спостереженні земної поверхні з рухомої платформи / Микитенко В.І., Рибалка М.С. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С.54 - 55.

58. Микитенко В.І. Модель оптичного зображення для комплексування у багатоканальних оптико-електронних системах / Котовський В.Й., Микитенко В.І. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2007. - С. 56 - 57.

59. Микитенко В.І. Створення оптико-електронного блоку цифрової кадрової фотокамери космічного базування / Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Бараненко І.В. // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (24-25 квітня 2007 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет.- Київ, 2007. - С. 52 - 53.

60. Микитенко В.І. Метод функціональної діагностики стану мікросудинної системи на основі обміну кисню та теплового випромінювання / Котовський В.Й., Ройтман Е.М., Микитенко В.І. // XXVII Международная научно-техническая конференция «Проблемы электроники», ч. 2. Сборник тезисов докладов / НТУУ «КПІ», Факультет електроніки. - Киев, 2007. – С.83-85.

61. Микитенко В.І. Комплексування зображень при денних дистанційних спостереженнях / Микитенко В.І. // VII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22-23 квітня 2008 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2008. - С.66.

62. Микитенко В.І. Покращення роздільної здатності зображень при дистанційному спостереженні Землі в умовах вібрацій / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // Перша студентська науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (23 квітня 2008 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2008. - С.18.

63. Микитенко В.І. Підвищення просторового розділення оптико-електронної системи спостереження за рахунок коливань платформи / Микитенко В.І. // Перша Всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (3-5 червня 2008 р.). Збірник тез доповідей / КП СПБ «Арсенал». - Київ, 2008. - С.45 - 46.

64. Микитенко В.І. Обґрунтування параметрів оптико-електронної системи спостереження для мікосупутників / Тимчик Г.С., Колобродов В.Г., Микитенко В.І. // Перша Всеукраїнська конференція «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (3-5 червня 2008 р.). Збірник тез доповідей / КП СПБ «Арсенал». - Київ, 2008. - С. 47 - 48.

65. Микитенко В.І. Використання об'єктивів змінного збільшення в двоканальних ОЕСС Микитенко В.І., Котовський В.Й. // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (28-29 квітня 2009 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2009.- С.43.

66. Микитенко В.І. Стратегія комплексування відео зображень / Микитенко В.І. // IX Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (27-28 квітня 2010 р.). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2010. - С.61 - 62.

67. Mykytenko V. A new approach to information fusion in optoelectronic surveillance systems / Rybalko M., Mykytenko V. // 11-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2010 (October 21-24). - Kyiv, 2010.

68. Микитенко В.І. Оцінка ефективності двоканальної ОЕСС з функцією комплексування інформації / Микитенко В.І., Рибалко М.С. // XI Міжнародна

науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2012. - С.72 - 73.

69. Микитенко В.І. Вплив оптичних характеристик поверхонь об'єкту на аналіз його теплового стану/ Микитенко В.І. // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2012. - С.64.

70. Микитенко В.І. Оцінка ефективності двоканальної ОЕСС з комплексуванням інформації за різних зовнішніх умов функціонування / Мамута М. С., Мамута О. Д., Микитенко В.І. // XII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2013. - С.66-67.

71. Mykytenko V. Image fusion for surveillance applications: state of the art and new aspects / Mykytenko V. // XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2014. - С.53-54.

72. Микитенко В.І. Моделирование и разработка многоканальных средств диагностики состояния человека на основе анализа его инфракрасного излучения / Микитенко В.І. // Материали за 10-а международна научна практична конференция «Динамиката на съвременната наука». Том 11. Технологии. «Бял ГРАД-БГ» ООД. - София, 2014. - С.49 - 53.

73. Mykytenko V. The impact of phase distortions in matrix imagers with information fusion on image quality / Mykytenko V. // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2015. - С. 50.

74. Микитенко В.І. Визначення ефективності оглядових оптико-електронних систем безпілотних літальних апаратів / Микитенко В.І. // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. - Київ, 2016. - С.51 - 52.

75. Микитенко В.І. Імплементация багатоспектральних ОЕСС на FPGA / Плотніков О.М., Микитенко В.І. // X науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування». Збірник тез доповідей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2017. - С. 40.

76. Mykytenko V. Infrared surveillance imager's application / Mykytenko V. // XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». - КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2018. - С. 51 - 52.

77. Микитенко В.І. Оптико-електронна система спостереження для наземної техніки / Микитенко В.І., Пашков Р.А. // XI науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (15-16 травня 2018 р.). КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2018. - С. 159-162.

78. Микитенко В.І. Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень / Микитенко В.І. // Третя Українська науково-технічна конференція «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи» (4-5 грудня 2018 р.), КП СПБ «Арсенал». - Київ, 2018. - С. 55 - 58.

79. Mykytenko V. Dual-band surveillance imagers evaluation / Mykytenko V. // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи». КПІ ім. Ігоря Сікорського, Приладобудівний факультет. - Київ, 2019. - С. 50 - 51.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та окремі наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 27 наукових конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування: стан і перспективи» (м.Київ, 2002 - 2019 рр.), XXVII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми електроніки» (м.Київ, 2007 р.), Першій Всеукраїнській конференції «Аерокосмічні спостереження

в інтересах сталого розвитку та безпеки» (Київ, 2008 р.), 11-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2010 (Kyiv, 2010), 10 Міжнародній науково-практичній конференції «Динаміката на сьвременната наука» (м.Софія, 2014 р.), III Українській науково-технічній конференції «Спеціальне приладобудування: стан і перспективи» (м.Київ, 2018 р.), науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування» (м.Київ, 2017, 2018 pp.), Twelfth International Conference on Correlation Optics (Chernivtzi, 2015), 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (Kyiv, 2019).